

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA DIDÁTICO PARA FINS ACADÊMICOS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4563

João Pedro Aguiar Araújo de Figueiredo - joao.p.figueiredo@ufv.br
Universidade Federal de Viçosa

Mariana Moraes Barreto - mariana.barreto@ufv.br
Universidade Federal de Viçosa

Gabriel Dias Uliana - gabriel.uliana@ufv.br
Universidade Federal de Viçosa

João Pedro Almeida Pinto - joao.pinto5@ufv.br
Universidade Federal de Viçosa

Mauro de Oliveira Prates - mauroprates@ufv.br
Universidade Federal de Viçosa

Resumo: *O estudo de máquinas elétricas e seu funcionamento é muitas vezes prejudicado pela dificuldade de visualização de seus componentes apresentados tanto em aulas teóricas quanto práticas. Dessa forma, o presente artigo conta com o desenvolvimento de um modelo de motor CC para fins didáticos, utilizando o dimensionamento de um motor real como base, posterior modelagem 3D e impressão do modelo. Por fim, a realização de pesquisa com alunos de engenharia elétrica da Universidade Federal de Viçosa a fim de validar seu uso e aplicabilidade.*

Palavras-chave: *Motor CC, Máquinas Elétricas, Impressão 3D.*

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA DIDÁTICO PARA FINS ACADÊMICOS

1 INTRODUÇÃO

O curso de graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Viçosa (UFV) é do tipo generalista, isto é, os alunos têm um contato amplo com diferentes áreas de atuação, incluindo eletrônica, robótica, sistemas elétricos de potência e telecomunicações, de forma que o aprofundamento em cada área se dá pela escolha do aluno em cursar uma série de matérias eletivas que permitem uma especialização temática.

As disciplinas que envolvem o conteúdo de máquinas elétricas na UFV possuem carga horária total de 90 horas teóricas e 90 horas de laboratório. O principal objetivo das disciplinas de máquinas elétricas é apresentar aos estudantes os conceitos e procedimentos para estudos de transformadores, máquinas de indução, de corrente contínua e síncronas. Com relação à Máquina de Corrente Contínua (MCC), a carga horária é de 30 horas teóricas e 30 horas práticas. As aulas práticas atuam como um complemento fundamental aos conteúdos teóricos aprendidos em sala de aula. Essa metodologia de ensino clássica, com aulas teóricas e atividades práticas em laboratório, ainda é predominante nas universidades brasileiras. Nesse tipo de abordagem, é priorizada a análise dos circuitos, com montagens prontas e experimentos pré-definidos (Bruno Dupezak, 2022). Na maioria das vezes, a teoria antecipa os resultados a serem obtidos em laboratório, de forma que o estudante já tem em mente o resultado desse experimento, e visa validá-lo.

Apesar do conhecimento acerca dos objetivos da ementa serem alcançados ao final da disciplina, os alunos apresentam dificuldades para relacionar a teoria com a aplicação prática, principalmente no que tange os aspectos construtivos de máquinas elétricas – os motores utilizados em laboratório não permitem uma boa visualização da sua estrutura interna, ficando como uma caixa preta e exigindo um grau elevado de abstração por parte dos estudantes para compreensão. Mediante essa falha da estrutura educacional observada, o presente trabalho tem como objetivo projetar um motor de corrente contínua, por meio de impressão 3D, mas com proporções reduzidas em comparação com os motores comumente comercializados no mercado, e que possa ser utilizado para auxílio dos alunos ao longo das disciplinas de máquinas elétricas.

Ao longo deste trabalho, serão apresentados os cálculos das dimensões das peças, modelagem 3D e a impressão 3D. É importante salientar que as peças que compõem o motor foram impressas separadamente, deste modo, é possível observar isoladamente cada estrutura, além de proporcionar, ao aluno, a experiência lúdica da montagem do motor como um quebra cabeça. Por fim, foi realizada uma pesquisa com os estudantes para avaliar a adequação do modelo ao seu objetivo proposto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de construção foi dividido em três etapas, sendo a primeira destinada a fins de cálculos para o dimensionamento da máquina e a segunda, para a modelagem 3D utilizando o software SolidWorks. Já a terceira etapa seguiu com a impressão das peças

por meio da impressora 3D. Além disso, o modelo também foi apresentado à turma de Engenharia Elétrica da UFV que cursava a disciplina de Máquinas Elétricas durante o desenvolvimento do presente artigo, onde foi aplicado um questionário para coletar a opinião deles.

Todos os cálculos para o dimensionamento tiveram como base teórica as fórmulas e tabelas apresentadas por MARTIGNONI (1987). Alguns dos pontos mais importantes são: rotor, comutador e número de pólos. Para o início do dimensionamento foi necessário definir potência (w) em watts ou kW, tensão (V) e número de rotações por minuto (RPM). Para esse projeto os valores escolhidos foram 1kW, 125V e 500 rpm, respectivamente. A escolha foi feita de modo com que as dimensões da máquina sejam as menores possíveis de acordo com as tabelas disponíveis para auxílio, e por limitações da impressão 3D. Por fim, foi feito um redimensionamento proporcional com o objetivo de manter as dimensões dentro do limite de impressão.

Para o dimensionamento do rotor foi necessário, primeiramente, o cálculo do diâmetro do eixo (d), parte responsável pela resistência à torção e flexão. O eixo será estável à flexão se o diâmetro do mesmo obedecer a Equação (1).

$$d = 0,8 * L_s \quad (1)$$

onde, L_s é a distância entre as extremidades do eixo.

Em seguida, foi feito o dimensionamento do comprimento (L_m) e diâmetro (D) do rotor. Para essa etapa foram utilizados os valores definidos de potência, tensão e rotação. A partir desses valores, é definido de forma tabelada o valor do diâmetro. Por sua vez, o comprimento é calculado a partir do valor definido para o diâmetro, de acordo com a Equação (2).

$$L_m = \frac{M}{D^2} \quad (2)$$

Onde, M é o fator volumétrico e por sua vez é definido pela Equação (3).

$$M = \frac{W_i}{n} * C \quad (3)$$

Onde, W_i representa a potência interna, dada pela razão entre a potência da máquina e seu rendimento; e o número de pólos da máquina e C é o valor tabelado do coeficiente de utilização.

As ranhuras serão utilizadas para realizar o enrolamento dos fios condutores para magnetização do rotor, e o número das mesmas foi definido com o intuito de facilitar a visualização, assim como sua profundidade e largura. O enrolamento previsto para esse rotor é o enrolamento imbricado, por ser o enrolamento mais utilizado em máquinas de baixa tensão.

O diâmetro do comutador (D_c) foi determinado a partir da Equação (4).

$$D_c = 0,65 * D \quad (4)$$

Além disso, foi definido o seu comprimento de tal forma a ajustar às lâminas do comutador. Para o comprimento dessas lâminas, foi definido um valor proporcional ao comprimento superfície de trabalho das escovas que estarão em contato. Já para o cálculo da espessura das lâminas, foi considerando o diâmetro do comutador e a quantidade de lâminas, que é igual a quantidade de ranhuras no rotor.

O número de pólos do motor é definido de forma tabelada utilizando a Equação (5).

$$n = \frac{W}{RPM} \quad (5)$$

O próximo passo foi definir a altura do pólo. Para isso, também foi utilizado o valor tabelado da altura das bobinas de enrolamento de excitação. Além disso, foi definido que o comprimento axial do pólo deveria ser igual ao do rotor, e o comprimento do arco de expansão (C_A), como na Equação (6).

$$C_A = 0,65 * \tau \quad (6)$$

onde τ é o passo polar.

O cálculo de diversos outros parâmetros de uma máquina de corrente contínua, como número de ranhuras, dimensões da carcaça e passo polar, também são apresentados em MARTIGNONI (1987).

O Quadro (1) contém os principais parâmetros calculados e ajustados para o projeto de modelagem 3D. Aqui, vale ressaltar que o dimensionamento foi ajustado para se adequar à impressão 3D e o projeto foi desenvolvido para que a máquina possa ser utilizada de forma acadêmica. Assim, todos os desenhos foram dentro de uma proporção e de forma que possibilite o desmonte da máquina.

Quadro 1 – Parâmetros da máquina CC.

Parâmetros		Dimensão (cm)
Rotor	Diâmetro	7
	Comprimento	3,5
	Passo Polar	11
	Nº de Ranhuras	8
Comutador	Diâmetro	4,5
	Comprimento	2,95
	Nº de Lâminas	8
	Comp. das Lâminas	1,85
	Espessura das Lâminas	2,06
Pólos	Nº de Polos	2
	Altura	1,8
	Comp. Axial	3,5
	Comp. do arco de expansão	5,35
Outros parâmetros	Diâmetro da Carcaça	15
	Comprimento da Carcaça	9

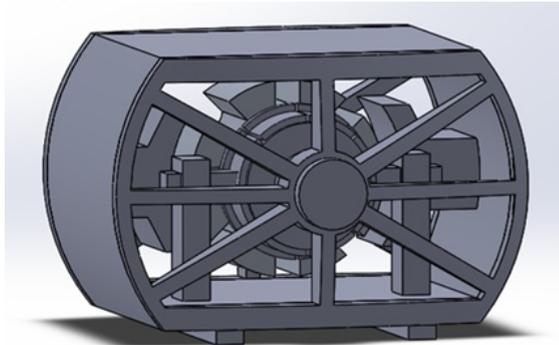
Fonte: Autores

3 RESULTADOS

A partir das dimensões determinadas na seção anterior, foram desenhadas as peças que formam a máquina em questão com uso do software SOLIDWORKS. Este modelo, uma vez impresso e estudado, apresentou algumas falhas construtivas que podem ser observadas na Figura 1: as duas bases dificultavam o encaixe e desencaixe da carcaça; as tampas da carcaça atrapalham a visualização dos componentes internos; a tampa superior impedia a visualização por completo do motor e o PLA utilizado era todo preto, o que dificultava a distinção das peças.

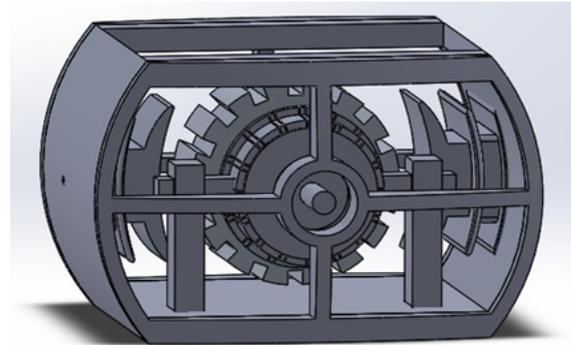
Dessa forma, uma nova impressão com os ajustes necessários foi realizada e os problemas citados anteriormente puderam ser resolvidos. Sendo assim, agora o motor pode ser facilmente montado e desmontado, as peças podem ser facilmente distinguidas, tem-se uma boa visualização interna após a montagem de todas as peças e representa um de maneira satisfatória um motor real. A figura representa o novo modelo de motor com as alterações já citadas.

Figura 1 - Primeiro protótipo do Motor CC.



Fonte: Autores.

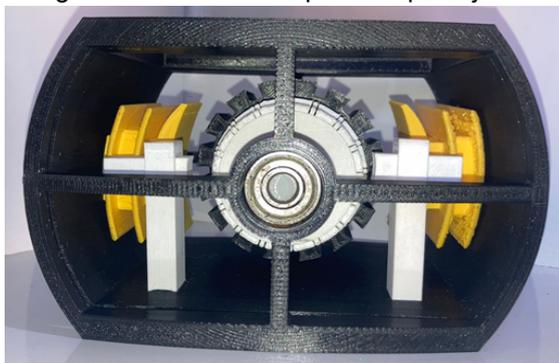
Figura 2 - Segundo Protótipo do Motor CC.



Fonte: Autores.

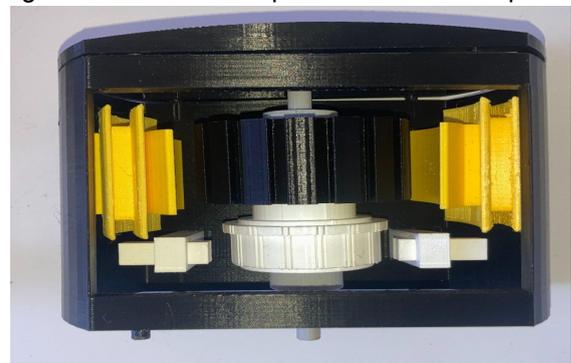
Esse modelo seguiu para impressão em PLA, e podemos observar os seguintes aspectos nas figuras 3 e 4: carcaça toda preta e proporciona o máximo de visibilidade quando toda montada, pólos na cor amarela, comutador e escovas na cor branca, rotor na cor preta e eixo na cor cinza. Também foram adicionados dois rolamentos nas extremidades do eixo, de forma que o aluno consiga girar o eixo e observar o movimento manual do motor.

Figura 3 - Motor CC impresso após ajuste.



Fonte: Autores.

Figura 4 - Motor CC impresso com vista superior.



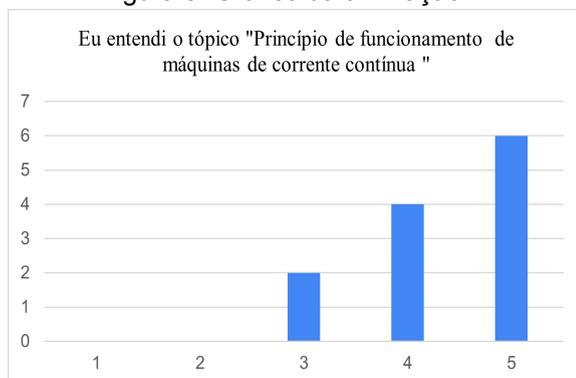
Fonte: Autores.

De posse do modelo impresso, foi elaborado um formulário baseado na ementa da disciplina que envolve o conteúdo de Máquina de Corrente Contínua, no qual buscou-se avaliar o entendimento do aluno acerca da teoria em conjunto com a prática, além do entendimento construtivo do motor. Após a apresentação e disponibilização do modelo para interação dos alunos, o formulário foi apresentado para a turma que cursou a disciplina durante o desenvolvimento deste trabalho. A turma era constituída por alunos do sétimo e oitavo período do curso de Engenharia Elétrica pela UFV, sendo que destes, doze responderam às perguntas teóricas e onze puderam responder tanto às perguntas teóricas quanto aquelas relacionadas ao modelo, uma vez que interagiram com o modelo impresso.

A ideia do formulário é entender o quanto a teoria, a prática e a visualização do motor se comunicam, e perceber a satisfação geral do aluno. O formulário foi separado em duas seções: uma totalmente baseada na ementa da disciplina de conversão eletromecânica de energia (que aborda MCC) e outra focada nas impressões do aluno em relação ao modelo apresentado. As respostas seguiram um modelo constante para cada pergunta, sendo as opções: 1 - Discordo fortemente; 2 - Discordo; 3 - Não sei dizer; 4 - Concordo; 5 - Concordo fortemente.

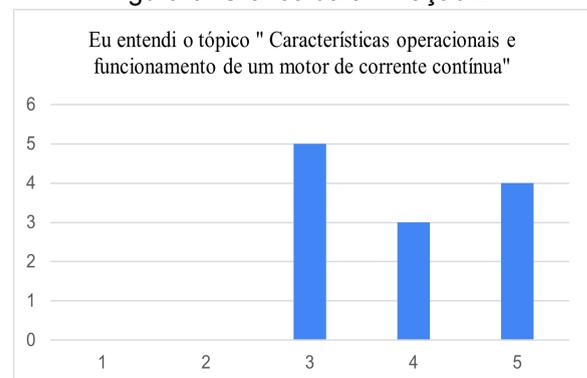
A Figura 5 traz o posicionamento dos alunos a respeito da afirmação 1 “Eu entendi o tópico Princípio de funcionamento de máquinas de corrente contínua”, já a Figura 6 é referente ao posicionamento dos alunos sobre a afirmação 2 “Eu entendi o tópico Características operacionais e funcionamento de um motor de corrente contínua”. Pelos dois gráficos, observa-se que os alunos possuem um bom conhecimento teórico dos assuntos analisados.

Figura 5: Gráfico da afirmação 1.



Fonte: Autores.

Figura 6: Gráfico da afirmação 2.

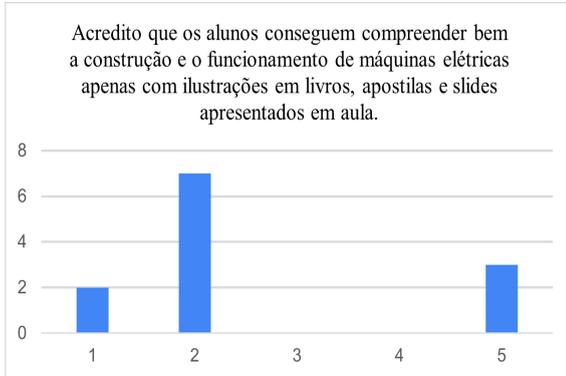


Fonte: Autores.

No entanto, diante dos questionamentos acerca dos aspectos construtivos de um motor CC representados pelas afirmações 3 e 4, “Acredito que os alunos conseguem compreender bem a construção e o funcionamento de máquinas elétricas apenas com ilustrações em livros, apostilas e slides apresentados em aula” e “De forma geral, entendi os aspectos construtivos de uma máquina elétrica, e saberia descrever com clareza seus principais componentes e funcionamento, apenas com aulas expositivas”, respectivamente, observa-se uma clara diferença: na Figura 7, tem-se uma menor concentração de respostas positivas, onde cerca de 25% acreditam que os alunos concordam fortemente com a afirmação 3, contra 58% que discordam dessa afirmação, e 17% que discordam fortemente. Já na Figura 8, pode-se perceber uma dispersão maior

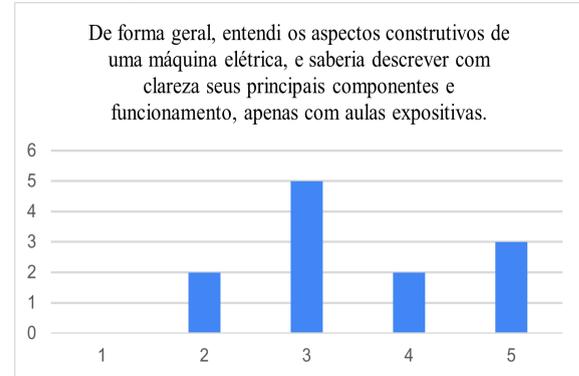
de respostas positivas com relação ao aprendizado, sendo a principal resposta “não sei dizer” com cerca de 42% para a afirmação 4.

Figura 7: Gráfico da afirmação 3.



Fonte: Autores.

Figura 8: Gráfico da afirmação 4.

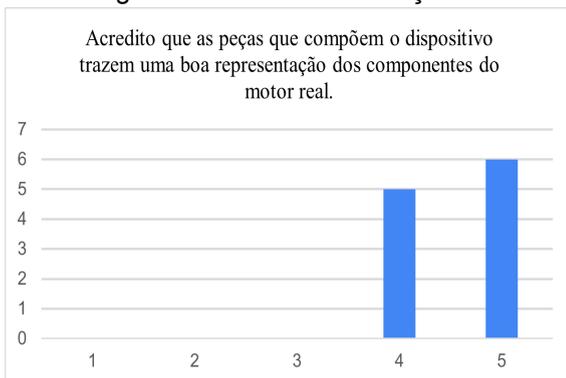


Fonte: Autores.

Quando feito a análise das respostas relacionadas ao protótipo do Motor CC percebe-se que o resultado foi majoritariamente positivo. Para tal análise foram feitas e avaliadas as afirmações 5,6,7 e 8 citadas, respectivamente, a seguir: “Acredito que as peças que compõem o dispositivo trazem uma boa representação dos componentes do motor real.”; “O dispositivo proporciona fácil processo de montagem”; “O dispositivo, quando montado (com todas as peças e carcaça inclusa) proporciona boa visão das peças que compõem o motor” e “O uso do dispositivo durante as aulas ajudaria no entendimento do assunto e o tornaria mais compreensível”.

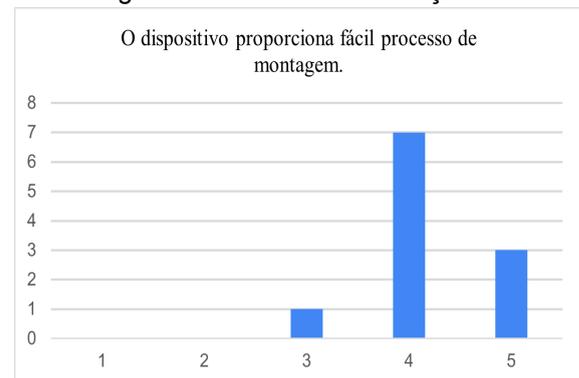
Na Figura 9, tem-se um resultado muito positivo, pois cerca de 54,5% concordam fortemente e 45,5% concordam com a afirmação 5. Já na Figura 10, observa-se que o objetivo de conseguir um protótipo que proporcione um bom processo de montagem foi alcançado, pois cerca de 27% concordam fortemente, 64% concordam e apenas 9% não sabem se posicionar diante da afirmação 6.

Figura 9: Gráfico da afirmação 5.



Fonte: Autores.

Figura 10: Gráfico da afirmação 6.

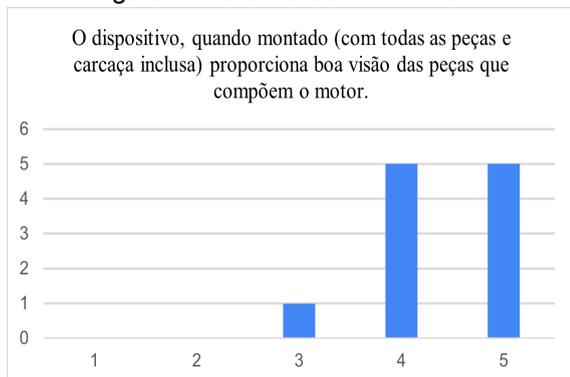


Fonte: Autores.

Ao analisar a Figura 11, percebe-se que mais um resultado positivo, pois 45,5% concordam fortemente, 45,5% concordam e 9% não sabem se posicionar a respeito da afirmação 7. Diante disso, pode-se dizer que o objetivo de conseguir um protótipo que proporcione uma boa visualização interna dos componentes foi alcançado. Já para a

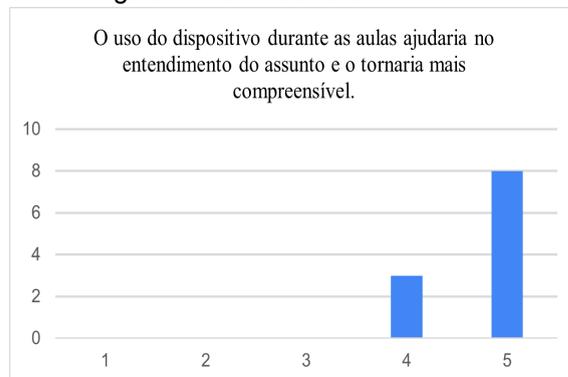
Figura 12, os alunos validam o uso do dispositivo, pois cerca de 73% concordam fortemente e 27% concordam com a afirmação 8.

Figura 11: Gráfico da afirmativa 7.



Fonte: Autores.

Figura 12: Gráfico da afirmativa 8.



Fonte: Autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas informações coletadas e analisadas por meio do formulário, foi possível observar a defasagem existente entre o aprendizado teórico e a compreensão prática da composição de máquinas elétricas. É decorrente supor que esse não é um problema isolado da disciplina em questão, como também de outros cursos de engenharia que seguem atrelados a métodos pouco interativos e tradicionais. Assim, projetos pedagógicos podem ser fortes aliados do processo de aprendizagem.

O uso do modelo mostra-se uma alternativa viável para corrigir essa defasagem, tendo boa aceitação e um retorno satisfatório por parte dos alunos, que também se mostraram interessados no projeto durante a apresentação do mesmo em sala. Dessa forma, tal protótipo poderá ser utilizado no decorrer das próximas aulas que abordam os assuntos referentes ao Motor de Corrente Contínua como suporte ao ensino.

Como sugestão para futuras pesquisas aponta-se a possibilidade de aprimorar o modelo didático do motor de corrente contínua, buscando a construção de um protótipo com funcionamento real. Para que isso seja possível, estuda-se a possibilidade do uso de PLA magnético na sua impressão ou até mesmo a usinagem de algumas peças, conferindo ao motor propriedades magnéticas e de condução. Dessa forma, mantém-se um aprimoramento contínuo do projeto, garantindo uma melhor compreensão dos conceitos de máquinas elétricas.

AGRADECIMENTOS

Ao laboratório do Núcleo de Especialização em Robótica da UFV por disponibilizar o uso dos equipamentos necessários para a impressão das peças, aos alunos de engenharia elétrica que contribuíram com a pesquisa e pelo auxílio do professor Mauro Prates no desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

GOUVEA, Rodrigo A.; RIBEIRO, Brisa P.; FAGUNDES, Leonardo A. Jr.; DE PAULA, Augusto C. A.; PRATES, Mauro de O. Projeto de uma máquina de indução trifásica didática para fins acadêmicos. In: XLVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2019, Ceará. **Anais**. Fortaleza. Disponível

em: file:///home/mariana/Downloads/COBENGE19_00090_00002247.pdf. Acesso em 4 nov. de 2022.

MARTIGONI, Alfonso. **Máquinas elétricas de corrente contínua**. 5. ed, Porto Alegre: GLOBO, 1987.

S. DUPEZAK, B. Protótipos didáticos para o ensino dos conversores CC-CC. **Revista Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 27, n. 3, p. 244–253, set. 2022.

PROJECT AND CONSTRUCTION OF A DIDACTIC CONTINUOUS CURRENT MOTOR FOR ACADEMIC PURPOSES

Abstract: *The study of electric machines and their operation is often harmed by the difficulty of visualization of its components, both in theoretical and in practical classes. Therefore, the present study features the development of a CC motor model for didactic purposes, using the dimensional parameters of a real motor as a template, with later 3D modulation and 3D printing of the model. Finally, research was carried out with Electrical Engineering students of Federal University of Viçosa in order to validate the model's use and applicability.*

Keywords: *CC motor. electric machines. 3D printing.*