

PROJETO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA DIDÁTICA PARA FINS ACADÊMICOS

*Rodrigo Augusto Gouvêa – rodriigo.gouvea@gmail.com
Departamento de Engenharia Elétrica - UFV
Campus UFV
36570-900 – Viçosa – MG**

*Brisa Ribeiro Pechincha – brisapechincha@gmail.com
Departamento de Engenharia Elétrica - UFV
Campus UFV
36570-900 – Viçosa – MG**

*Augusto César de Paula Araújo – augustocdpa@outlook.com
Departamento de Engenharia Elétrica - UFV
Campus UFV
36570-900 – Viçosa – MG**

*Leonardo Alves Fagundes Júnior – leonardo.fagundes@ufv.br
Departamento de Engenharia Elétrica - UFV
Campus UFV
36570-900 – Viçosa – MG**

*Mauro de Oliveira Prates – mauoprates7@gmail.com
Departamento de Engenharia Elétrica - UFV
Campus UFV
36570-900 – Viçosa – MG**

Resumo: A aprendizagem de conceitos relacionados a máquinas elétricas é dificultada pela impossibilidade de visualização prática dos conceitos apresentados em aulas teóricas. Neste contexto, este trabalho propõe a criação de um modelo didático de uma máquina de indução trifásica, visando sua utilização em estudos relacionados, otimizando o aprendizado através de uma abordagem prática e visual. O processo de desenvolvimento se inicia nos cálculos matemáticos, os quais definem os parâmetros do modelo a ser projetado em software 3D para posteriormente ser impresso via impressora 3D. Este segue as premissas de fácil reprodução e baixo custo, sendo uma opção viável para complementar os conhecimentos em máquinas elétricas em diversos ambientes de ensino.

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



Palavras-chave: Máquinas Elétricas. Motor de Indução Trifásico. Impressão 3D.

1 INTRODUÇÃO

O ensino em disciplinas relacionadas às máquinas elétricas acontece, principalmente, por meio de recursos pedagógicos estáticos - com a apresentação dos princípios de construção e funcionamento dos equipamentos, bem como ensaios em dispositivos reais - e em aulas que utilizam metodologias dialógico-expositivas. No entanto, alguns elementos práticos dos currículos escolares sofrem demasiadamente, devido às dificuldades de abstração necessárias e requeridas para entendimento, por parte dos alunos, do conteúdo apresentado.

Neste contexto, a disciplina de Máquinas Elétricas (e outras correlatas), por necessidades curriculares e de estabelecimento de conhecimentos sobre seu conteúdo, vincula a contextualização teórica à aplicação dos estudos com ensaios práticos em máquinas reais. Neste âmbito, há elementos da disciplina que se destacam em termos de dificuldade na visualização e entendimento da teoria e da prática: aspectos construtivos de uma máquina elétrica.

Observa-se que a introdução de equipamentos reais, motores e geradores, utilizados atualmente no mercado, não supre a necessidade do conhecimento dos princípios básicos de construção de uma máquina real no curso de Engenharia Elétrica.

Pensando nisso, o projeto em questão visa conferir aos professores, além de recursos didáticos adicionais, novos formatos a serem abordados permitindo um favorecimento e o acréscimo de informações acerca dos parâmetros levados em conta na construção dos motores e geradores práticos para a engenharia. A iniciativa tem como principal objetivo promover o desenvolvimento de projetos utilizando-se de conceitos apresentados durante toda a graduação. Através desta proposta, os alunos têm a chance de obter mais conhecimentos práticos, os quais não são plenamente compreendidos ao longo da carga horária obrigatória do curso: o desenvolvimento de habilidades práticas na área de máquinas elétricas, através da construção dos três principais tipos de máquinas estudadas ao longo da graduação. Estas são construídas utilizando técnicas de impressão 3D, em tamanhos menores que os comumente comercializados. Os motores têm princípios majoritariamente didáticos, tendo como finalidade principal a apresentação em salas de aula, a fim de elucidar seus princípios de funcionamento bem como exemplificar de maneira intuitiva e prática seus princípios construtivos.

Para o projeto, a construção do modelo didático de um motor de indução trifásico se iniciou com a análise da estrutura de um motor desse tipo, mas de marca e modelo desconhecidos, presente no laboratório de máquinas elétricas da UFV. A partir do modelo, foram necessárias várias pesquisas e estudos, para determinação dos parâmetros da máquina, a fim de construí-la com o menor custo possível e maior eficiência a partir das ferramentas possíveis de construção em impressoras 3D.

Na máquina de indução, de maneira análoga a um transformador, a corrente é fornecida para o rotor através da indução por meio da alimentação de corrente alternada diretamente ao

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



estator. No ramo estatórico de motores de indução com rotor em gaiola de esquilo, as bobinas são fixadas em um núcleo magnético com a finalidade de aumentar o fluxo magnético do campo gerado, formando assim, eletroímãs nos pólos da máquina. Motores CC apresentam pólos fixos, em contrapartida, um campo magnético girante é produzido em motores de corrente alternada para a excitação da máquina (OLIVEIRA, 2009). Sua velocidade é determinada pela quantidade de polos e pela frequência aplicados ao estator. A partir do modelo de motor de indução presente no laboratório, foi definido que o modelo a ser desenvolvido seria do tipo rotor em gaiola de esquilo, por ser o mais utilizado dentro desta classe de máquinas (Umans, p. 344).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do modelo didático da máquina de indução, foi utilizada a técnica de impressão 3D. Esta técnica consiste no processamento de polímeros para a construção de peças com os mais variados formatos. Uma série de polímeros podem ser utilizados durante as impressões, sendo os mais conhecidos o ácido polilático (PLA) e o copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno (ABS). Existem também materiais especiais que apresentam outras propriedades físicas, como por exemplo o PLA magnético, que incorpora um pó de ferro pulverizado ao polímero, de modo a apresentar propriedades ferromagnéticas porém não atua como ímã e não conduz eletricidade (*Protoplant, Inc.*).

A escolha do material ideal depende da aplicação para qual a impressão se destina, e também das especificações da impressora utilizada. Para esta aplicação, optou-se por utilizar dois materiais distintos - o ABS e o PLA magnético. O material ABS foi escolhido para as partes estáticas da máquina por possuir um ponto de fusão mais elevado quando comparado ao PLA (*Innofil 3D*). A relevância deste fato é devido ao motor não possuir um sistema de refrigeração próprio para a dissipação do calor gerado pelo efeito Joule nas bobinas. Já o PLA magnético foi escolhido para a construção do rotor, devido às suas propriedades ferromagnéticas, que auxiliam na concentração do campo magnético da máquina.

O primeiro passo na impressão 3D é a construção de modelos gráficos das peças desejadas. Para tal, é necessário o uso de um software de projetos 3D, capaz de gerar arquivos em formatos compatíveis com a impressora utilizada. Neste caso, foi utilizado o software SolidWorks, capaz de gerar arquivos em formato.stl, sendo este compatível com a impressora utilizada, a Zortrax M200.

Para construir a máquina, é estabelecido que deve-se determinar os parâmetros desejados para o projeto e, então, a partir de seus cálculos e tabelas pré-estabelecidos teórica ou empiricamente, determinar os parâmetros mecânicos da mesma como comprimento do rotor e do estator, quantidade de ranhuras, número de condutores e outro (Martignoni, 1978).

Inicialmente, definiu-se que o motor absorveria uma potência de 0,5 CV, sob uma tensão de 220V. Para o cálculo das dimensões principais do motor convém empregar-se o valor da potência do mesmo em kVA, o qual é obtido pela equação:

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



$$kVA = CV \cdot \frac{736 \times 10^{-3}}{\mu \cdot \cos(\varphi)} \quad (1)$$

O motor foi projetado para ter um par de pólos, $p = 1$, rendimento 0,75 e fator de potência 0,83. Sendo assim, a potência aparente nominal dessa máquina é 0,59 kVA. Como isso, a corrente de linha é de aproximadamente 1,55A.

Considerando o fato de que o tamanho da máquina é limitado por questões de impressão, definiu-se 18 ranhuras no estator e 24 no rotor, com uma proporção de 3x4 entre estator e rotor. O número de ranhuras definido teve por base a existência de motores práticos com bom desempenho.

Sendo assim, o estator possui:

$$Z = \frac{\text{Canais}}{\text{fase} \cdot \text{polos}} = \frac{18}{3 \cdot 2} = 3 \text{ canais por polo e por fase.}$$

Foi calculado também o fator volumétrico (M) para um rotor em curto-circuito, de acordo com a eq. (2).

$$M = D^2 \cdot lm = 10^{11} \cdot 5,8 \cdot \frac{CV}{K'_a \cdot B_m \cdot n \cdot A \cdot (\mu \cdot \cos(\varphi))} \quad (2)$$

onde K'_a , o fator de forma de enrolamento, é igual a 0,966; B_m , o valor máximo de indução, é igual a 0,53T. Define-se o diâmetro do induzido, D, como o diâmetro do rotor; o comprimento magnético, lm, como sendo o comprimento magnético efetivo; e A, o valor de ampère-fios por centímetro, que neste caso, será 135.

Com esses parâmetros, chega-se ao fator volumétrico $M = 186,778 \text{ cm}^3$, que apresenta uma diferença percentual de 2,63% em relação ao valor tabelado para este tipo de motor operando com alimentação a 60 Hz, com $M = 182 \text{ cm}^3$.

A relação entre o diâmetro D e o comprimento magnético lm não é constante, mas aumenta com o aumento dos pólos da máquina. Para uma máquina de um par de pólos, tem-se $\varepsilon = D/lm = 0,8$, podendo variar em mais ou menos 20%.

Com isso, o diâmetro do induzido é dado por: $D = \sqrt[3]{\varepsilon M} = 5,31 \text{ cm}$.

Funcionando como motor, a máquina de indução trifásica apresenta uma velocidade de rotação entre zero e a velocidade síncrona ou do campo magnético girante, n, que é menor do que a velocidade de sincronismo do motor, ns. Sendo assim, a diferença entre tais velocidades é chamada de escorregamento, que é a característica que confere a indução do campo magnético ao enrolamento do motor e o faz girar (CORREIA, 2014).

Assim, podemos definir os seguintes parâmetros da máquina:

- Passo polar: $\tau = \frac{\pi D}{2p} = 8,5 \text{ cm}$.
- Rotações por minuto do campo rotativo: $n = \frac{60f}{p} = 3600 \text{ rpm}$.
- Velocidade periférica: $v = \frac{\pi D n}{60} = 10,01 \text{ m/s}$.

A corrente absorvida pelo estator passa a ser:

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



$$I_f = kVA \cdot \frac{10^{-3}}{3V_f} = 1,548A \quad (3)$$

valor que se encontra muito próximo ao tabelado. A tensão de fase máxima gerada nesta máquina atuando como gerador será:

$$V = V_f \cdot \frac{Nr}{Nl} = \frac{220}{\sqrt[3]{3}} \cdot \frac{8}{468} = 2,12V \quad (4)$$

Após alguns ajustes, chegou-se às características construtivas mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros construtivos da máquina

Parâmetros	
Número de ranhuras do estator	18
Número de ranhuras do rotor	24
Canais por polo e por fase no estator	3
Número de condutores por fase no rotor	8
Diâmetro do rotor	5,4 cm
Comprimento geométrico do estator	7,66 cm
Condutores por canal por fase	78

3 RESULTADOS

A partir dos parâmetros dimensionados na seção anterior, foram desenvolvidos os modelos no SolidWORKS, e em seguidas impressos na impressora 3D, apresentados nas figuras seguintes.

As Figura 1 (a) e (b) mostram o estator da máquina de indução desenhado no SolidWORKS, onde se verifica a presença de estruturas conhecidas como ranhuras, que são responsáveis por acomodar as bobinas, além de uma camada de Filme Poliéster, que garante o correto isolamento elétrico entre as bobinas e a estrutura da máquina. Cada ranhura possui área igual a 320mm², definida em razão da área ocupada pelos 78 condutores e seus respectivos

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



isolantes. Após a conclusão do desenho no software, foi possível a impressão propriamente dita, onde foi necessário importar os arquivos por um software próprio da fabricante da impressora. O início do processo de impressão do estator pode ser observado na Figura 1(c), e o resultado final é apresentado na Figura 1(d).

A Figura 2 ilustra tampa no SolidWORKS e impressa. Por questões didáticas de identificação das peças, as mesmas foram impressas usando cores distintas de ABS. É possível observar que foram feitas aberturas na mesma para facilitar a refrigeração, otimizando a troca do calor gerado através de efeito Joule pelas bobinas. Enquanto em um motor real este calor seria transferido por meio de condução através carcaça metálica, no modelo proposto este efeito é reduzido consideravelmente devido à condutividade térmica relativamente baixa do ABS utilizado no estator.

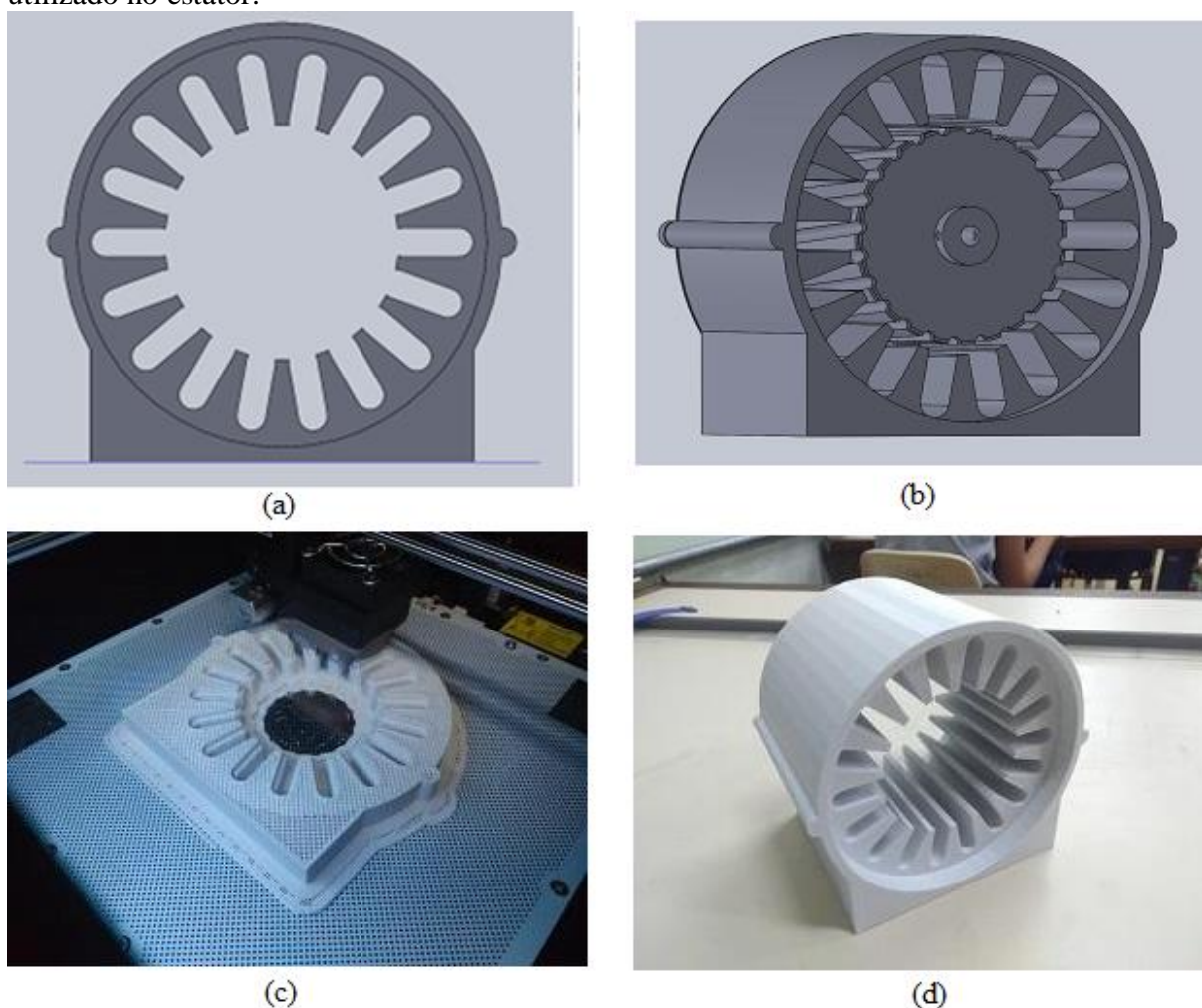


Figura 1 - Estator da máquina, (a) no SolidWORKS – corte frontal; (b) no SolidWORKS – vista lateral; (c) início da impressão; e (d) impresso na impressora 3D.

Promoção:



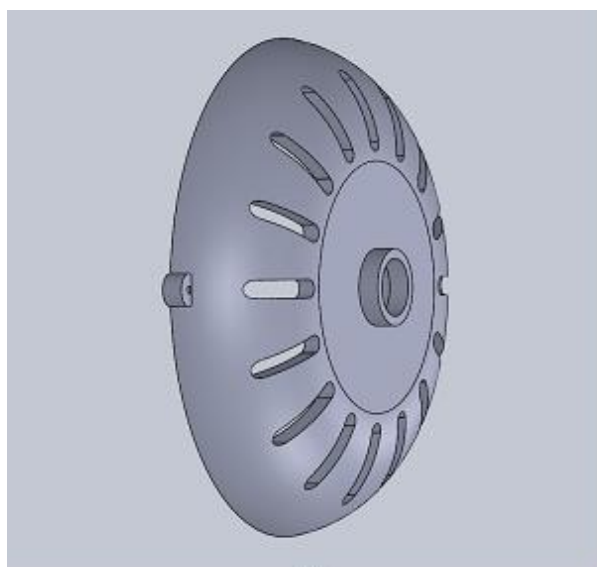
Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:





(a)



(b)

Figura 2 – Tampa, no (a) SolidWORKS e (b) impressa na impressora 3D.

O rotor proposto é do tipo gaiola de esquilo, e seu projeto visou conciliar a precisão dos valores obtidos através de cálculos e a viabilidade de impressão, resultando no desenho apresentado na Figura 3. Estes cuidados se justificam devido à complexidade e importância da peça em si, e também as particularidades e alto valor agregado do material utilizado. As ranhuras paralelas presentes ao longo da estrutura externa do rotor visam facilitar a visualização da estrutura metálica com formato de gaiola de esquilo, que dá o nome ao modelo escolhido. No modelo proposto, esta estrutura é construída usando fios rígidos de cobre. A peça conta ainda com um orifício central, onde deve ser inserido o eixo de rotação da máquina, para seu correto funcionamento.

O rotor da máquina será impresso posteriormente, após ajustes de temperatura e testes específicos para o uso de PLA magnético na impressora utilizada. As impressões concluídas até o momento apresentam a robustez estrutural esperada e buscada durante o projeto, demonstrando uma grande similaridade com o desenho de motores reais, algo proposital quando se trata de modelos didáticos.

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:





Figura 3 - Desenho do rotor da máquina

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um modelo didático de um motor de indução trifásico, construído utilizando técnicas de impressão 3D. O modelo foi primeiramente elaborado com auxílio do software *SolidWorks*, a partir de cálculos e conceitos técnicos obtidos através da literatura estudada. O *layout* resultante foi bastante similar a modelos comerciais, respeitando as diretrizes de fácil reprodução, baixo custo, além de ser bastante compacto e apresentar a possibilidade de separação das peças para fins didáticos.

Posteriormente, o modelo foi impresso, utilizando ABS para as peças estáticas e será utilizado PLA magnético para o rotor, visando concentrar o campo magnético da máquina. O projeto encontra-se na fase final de impressão, com a continuação consistindo na impressão das peças restantes, acabamento, montagem e posterior ensaio em laboratório do motor. Estes ensaios deverão constatar se os valores calculados durante o processo de projeto foram alcançados, mantendo as suas características didáticas.

Posteriormente à finalização da impressão e realização de testes práticos, propõe-se a realização de um estudo sobre os impactos da utilização dos modelos na absorção de conhecimentos abordados em sala de aula.

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



Agradecimentos

Ao apoio do CNPq/PIBIC com a concessão de bolsa de iniciação científica, ao departamento de Engenharia Elétrica da UFV pelo auxílio prestado no desenvolvimento do projeto e ao departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV, por disponibilizar os equipamentos necessários para a impressão das peças.

REFERÊNCIAS

Innofil 3D. **Technical Data Sheet - PLA by Innofil 3D BV.** Disponível em: <https://www.innofil3d.com/wp-content/uploads/2016/05/TDS-Innofil3D-PLA-160608.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2019.

Innofil 3D. **Technical Data Sheet - ABS by Innofil 3D BV.** Disponível em: <https://www.innofil3d.com/wp-content/uploads/2016/05/TDS-Innofil3D-ABS-160609.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2019.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de Corrente Alternada.** 3ª edição, Porto Alegre: Editora GLOBO, 1978.

DE OLIVEIRA, J. G. S. M. **Materiais usados na construção de motores elétricos.** Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Seminário Técnico, PUCRS, p. 15. 2009.

Protoplant, Inc. **Proto-pasta - Magnetic Iron PLA.** Disponível em: <https://www.proto-pasta.com/pages/magnetic-iron-pla>. Acesso em: 23 abr. 2019.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7ª edição, Porto Alegre: Editora AMGH, 2014.

CORREIA, A. J. L. **Estimação de Parâmetros Mecânicos de Motores de Indução Trifásicos com Rotor em Gaiola de Esquilo.** Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, p. 145. 2014.

DESIGN OF A THREE-PHASE INDUCTION MACHINE FOR ACADEMIC PURPOSES

Abstract: *The learning of concepts related to electrical machines is often hampered by the impossibility of practical visualization of the concepts presented in theoretical classes. In this context, this work proposes the creation of a didactic model of a three-phase induction machine, aiming its use in related studies, optimizing the learning through a practical and visual*

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:



approach. The development process begins in mathematical calculations, which define the parameters of the model to be designed in 3D software for later printing via a 3D printer. This follows the premises of easy reproduction and low cost, being a viable option to complement the knowledge in electrical machines in diverse educational environments.

Key-words: *Electric machines. Three Phase Induction Motor. 3D printing.*

Promoção:



Realização:



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO CEARÁ

Organização local do evento:

