

INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

Título do Trabalho: Simulação Dinâmica de Máquinas Elétricas como Ferramenta de Ensino nos Laboratórios do Curso de Engenharia Elétrica.

Órgão Financiador: FAPEMIG.

Tipo de Bolsa: Pesquisa Aplicada.

Autor (es): Ana Carolina Silva Castro, Mariana Guimarães dos Santos, Gustavo Lobato Campos e Ana Paula Lima dos Santos.

Palavras-chave: Máquinas de corrente contínua, simulação computacional, MATLAB.

Campus: Formiga.

Área do Conhecimento (CNPq): Máquinas Elétricas.

RESUMO

As máquinas elétricas são equipamentos essenciais para a realização de atividades cotidianas em ambientes residenciais e industriais. O entendimento e aprendizado sobre o princípio de funcionamento de tais equipamentos é por muitas vezes difícil, em função da grande quantidade de conceitos e relações matemáticas presente. A realização de simulações permite uma compreensão clara do funcionamento de todo um sistema, sem a necessidade de implementação prática de montagens que seriam complexas e caras. Desta forma, utilizam-se simulações em quase todas as atividades, seja para construção e desenvolvimento de um equipamento, ou seja, para escolha do melhor equipamento a ser utilizado em determinada aplicação. Assim, visando um aprendizado completo e eficiente na área de máquinas elétricas, o seguinte projeto propõe o desenvolvimento de ferramenta computacional capaz de simular o comportamento da máquina de corrente contínua em excitação independente sob diferentes condições de carga. O objetivo é auxiliar professores e alunos no processo de aprendizagem. A ferramenta computacional é desenvolvida em MATLAB e os resultados são apresentados por meio de suas curvas características de saída tanto para os motores quanto para os geradores em excitação independente. A validação da modelagem computacional é realizada por meio de comparação com medições realizadas no laboratório e com trabalhos de outros autores.

INTRODUÇÃO:

As máquinas elétricas são dispositivos conversores de energia que estão presentes em quase todas as aplicações industriais e atividades que envolvem a manipulação de cargas. As máquinas podem ser classificadas, conforme o seu tipo de alimentação, em máquinas de corrente contínua ou máquinas de corrente alternada. Ambas encontram aplicações em diferentes atividades (FOWLER, 2013).

No que diz respeito às máquinas elétricas, existe ainda uma classificação conforme o fluxo de energia da mesma, em motores (conversão de energia elétrica em mecânica) ou geradores (conversão da energia mecânica em elétrica). No caso das máquinas de corrente contínua, ainda existe uma classificação dos motores e geradores conforme a alimentação do seu enrolamento de campo em: excitação independente, série, shunt e composto cumulativo ou diferencial (KOSOW, 2000; FITZGERALD et al., 2014).

Devido a sua versatilidade, as máquinas de corrente contínua encontram grande aplicação, principalmente como motores, em atividades como laminação de metal, indústria têxtil, prensas, veículos de tração, guinchos e guindastes, dentre outros (DEL TORO, 1999).

O estudo das máquinas de corrente contínua engloba conhecimentos a respeito do seu princípio de funcionamento, tipos de acionamentos e avaliação de suas características para diferentes condições de carga. Muitas vezes, o ensino de conhecimentos desta natureza é de difícil compreensão por parte dos alunos, principalmente no que diz respeito à associação entre conhecimentos teóricos e práticos (FARIAS, 2017).

O modelo de ensino adotado na educação de engenharia e encontrado na maioria das universidades é fortemente dependente do professor, das técnicas de ensino e dos recursos institucionais. Na busca por técnicas de ensino e de aprendizagem mais eficientes, os professores buscam ensinar os conceitos teóricos associados a habilidades práticas e, neste contexto, o uso de simulação computacional como ferramenta pedagógica está cada vez mais presente nas práticas docentes, possibilitando uma dinâmica de ensino que promove um aprendizado mais significativo e motivador (KHALIL, 2012; LODER ET AL., 2007).

Na engenharia elétrica, as ferramentas computacionais são muito utilizadas para simulação de problemas e na modelagem de equipamentos e sistemas. No entanto, muitas vezes, essas ferramentas não são exploradas como método de aprendizagem nas universidades, sendo aplicadas em poucas disciplinas do curso.

Uma das razões que limita a utilização de tais ferramentas é que o desenvolvimento da modelagem dos equipamentos e sistemas requer um tempo de estudo que normalmente é incompatível com a carga horária e ementa das disciplinas. Assim, o desenvolvimento prévio de ferramentas computacionais capazes de simular o comportamento de sistemas e equipamentos para diferentes situações pode tornar a utilização da simulação computacional uma ferramenta de aprendizagem viável para algumas disciplinas (MARCHETTO ET AL., 2016). Neste caso, a modelagem de tais dispositivos permitiria ao aluno uma visualização do comportamento de tais máquinas em situações que não são possíveis em laboratório. Além disso, é possível confrontar os conhecimentos teóricos, com as medições práticas de bancada e com os resultados obtidos pela simulação. Esse tipo de abordagem, além de desenvolver habilidades computacionais, estimula e motiva a aprendizagem dos alunos (PEREIRA, 2016; BELHOT ET AL., 2001).

Diante do exposto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa de simulação do comportamento da máquina elétrica de corrente contínua em excitação independente, realizado na ferramenta MATLAB®, operando como motor e como gerador.

Vale destacar, que a intenção do modelo está na operação de tais dispositivos em regime permanente e na extração de curvas características práticas encontradas nas bibliografias utilizadas para o ensino desta máquina. A maioria dos artigos encontrados na literatura utiliza o modelo da máquina de corrente contínua no domínio do tempo e apresenta como resultados, curvas dinâmicas, formas de onda de tensões, torques e correntes (YILDIZ, 2012; ALVARADO, 2012; CRESPO ET AL., 2010; MELO, 2006). Tais resultados são relevantes para o estudo das máquinas elétricas de corrente contínua, no entanto, as curvas obtidas neste trabalho mostram-se mais adequadas didaticamente, uma vez que são as curvas típicas apresentadas pelas principais referências bibliográficas utilizadas para o ensino de máquinas elétricas.

METODOLOGIA:

O desenvolvimento da ferramenta computacional para simulação do comportamento da máquina de corrente contínua em excitação independente utiliza como base as equações em regime permanente de tal dispositivo e as equações provenientes do circuito equivalente da mesma (CARVALHO, 2007).

O objetivo deste projeto é modelar e implementar computacionalmente o comportamento das máquinas de corrente contínua em excitação independente. A abordagem é baseada nas equações de torque e tensão gerada (Equações 1 e 2) utilizadas nos estudos das máquinas de corrente contínua e no seu circuito equivalente facilmente encontrado nas referências bibliográficas da área (CARVALHO, 2007, FITZGERALD, 2014; KOSOW, 2000).

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot w \quad \text{Equação (1)}$$

$$T = k \cdot \Phi \cdot I_a \quad \text{Equação (2)}$$

Nas quais: E_a é a tensão gerada na armadura, T é o torque produzido na armadura, k é uma constante que depende de aspectos construtivos das máquinas, Φ corresponde ao fluxo principal de funcionamento da máquina e varia de acordo com o tipo de alimentação, w é a velocidade angular de rotação da máquina em rads/s e I_a é a corrente de armadura.

As considerações e simplificações pertinentes realizadas estão descritas em CHAPMAN (2013). Os fluxogramas apresentados nas Figuras 1 e 2 resumem o passo a passo para o desenvolvimento da ferramenta computacional da máquina em excitação independente operando como motor e como gerador. O detalhamento do desenvolvimento de cada fluxograma é apresentado em (CASTRO, 2018).

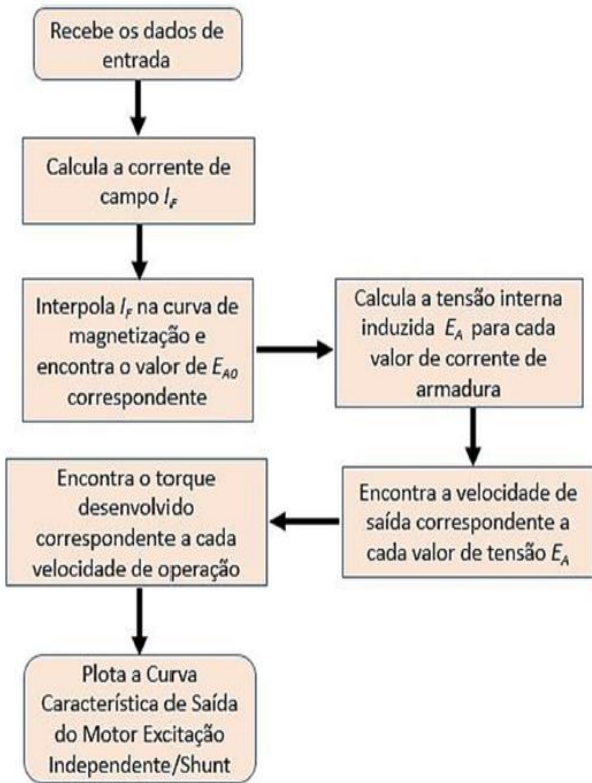


Figura 1: Fluxograma do algoritmo do motor excitação independente.

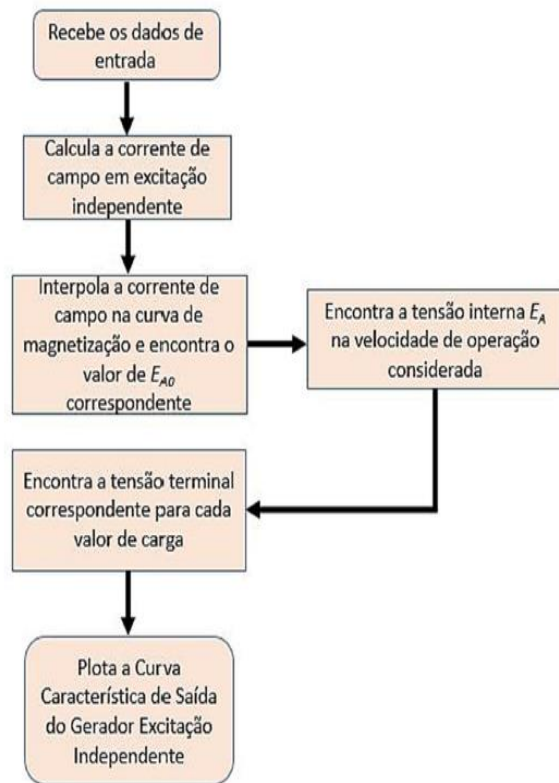


Figura 2: Fluxograma do algoritmo do gerador excitação independente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A ferramenta computacional desenvolvida apresenta como resultado as curvas características de saída do gerador e motor de corrente contínua em excitação independente amplamente divulgadas nas referências destes estudos. A validação dos resultados é realizada por meio de comparação com as referências citadas e com dados de medições reais de ensaios realizados no laboratório de máquinas elétricas do IFMG - Campus Formiga. Para facilitar a análise e a validação os resultados de medição e de simulação são apresentados no mesmo gráfico.

As Figura 3, 4 e 5 apresentam, considerando a configuração em excitação independente, respectivamente, a curva característica simulada e medida para o gerador CC, a curva simulada para o motor CC e a curva de saída teórica do mesmo motor.

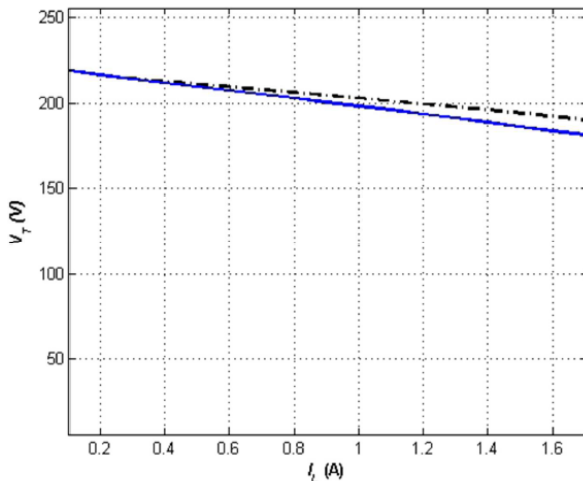


Figura 3: Curva de saída do gerador excitação Independente: simulada (azul), prática (preto).

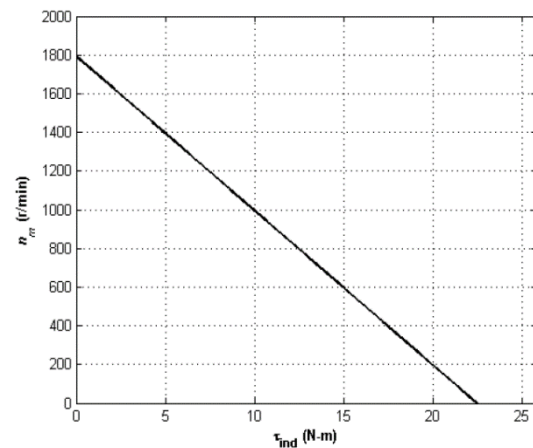


Figura 4: Simulação da curva característica do motor excitação independente.

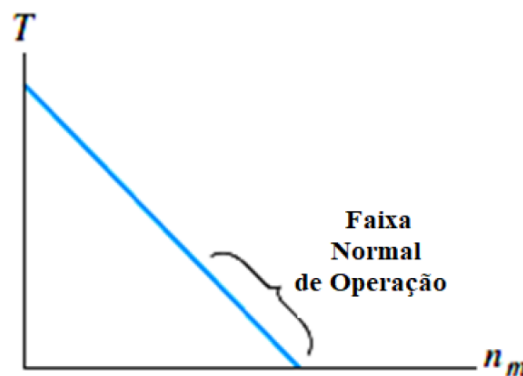


Figura 5: Curva teórica de saída do motor excitação independente.
Fonte: Hambley, 2014.

Por meio da Figura 3, observa-se que os resultados de simulação e de medição do gerador são muito próximos e o máximo erro percentual está em torno de 5%. No que diz respeito aos resultados de motor, as comparações são realizadas com dados de simulação encontrados na literatura, por causa da dificuldade de adicionar cargas ao eixo do motor em medições em laboratório, apresentando comportamento compatível e validando o programa.

CONCLUSÕES:

A ferramenta computacional é desenvolvida com base nas equações que modelam o comportamento das máquinas de corrente contínua (geradores e motores) em regime permanente. O objetivo é produzir curvas de interesse prático ao estudo de tais dispositivos na configuração em excitação independente. Os resultados das simulações computacionais, gerados com a utilização da ferramenta computacional desenvolvida, mostram uma alta concordância com as curvas obtidas nas principais referências bibliográficas utilizadas no estudo das máquinas elétricas de corrente contínua. Além disso, os resultados relacionados ao gerador são comparados com medições realizadas em ensaios executados em laboratório, apresentando erro percentual máximo de 5%. A característica de saída do gerador simulado apresenta comportamento linear decrescente e demonstra a queda de tensão prevista ao longo do aumento de carga. Com relação ao motor excitação independente, a simulação computacional permite a avaliação de seu desempenho para condições de carga impossíveis de se reproduzir nas aulas práticas de máquinas elétricas do laboratório do IFMG - Campus Formiga. Observa-se que a relação entre o torque e a velocidade pode ser considerada linear. Estas verificações são explicitadas nos livros sobre este assunto e validam os resultados encontrados. Com o *software* desenvolvido, há inúmeras opções de simulação e de investigação do comportamento de cada máquina para situações diversas, o que torna este programa uma ferramenta de grande potencial para tornar o aprendizado de máquinas elétricas CC mais flexível e efetivo.

Como perspectivas de trabalhos futuros, incluem-se a modelagem e implementação computacional das configurações de máquinas CC restantes (shunt, série e composto) e a integração de todas elas à uma interface gráfica didática desenvolvida no próprio ambiente MATLAB, com a ferramenta GUIDE.

AGRADECIMENTOS:

A todos os integrantes do Grupo de Pesquisa CNPq, GSE (Grupo de Soluções em Engenharia), pela interação e colaboração no desenvolvimento do presente trabalho, assim como ao IFMG - *Campus Formiga*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALVARADO, M. S. **Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura.** Latin-American Journal of Physics Education, Vol. 6, No. 1, pp. 155-161, mar. 2012.

BELHOT, R. V.; FIGUEIREDO, R. S.; MALAVÉ, C. O. O uso da simulação no ensino de engenharia. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2001.**

CARVALHO, Geraldo. **Máquinas elétricas.** São Paulo: Érica, 2007.

CASTRO, A. C. S. **Ferramenta Computacional Didática para Simulação de Máquinas Elétricas de Corrente Contínua.** IFMG, Formiga: Trabalho de Conclusão de Curso, 2018.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** Porto Alegre: AMGH, 2013.

CRESPO, D. L.; GUINGLA, D. A. **Modelamiento y Simulación de un Motor/Generador Eléctrico de Corriente Continua Controlado por Campo/Armadura y con Carga.** Espol, pp. 1-5, 2010.

DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** São Paulo: LTC, 1999.

FOWLER, R. **Fundamentos de Eletricidade: Corrente Contínua e Magnetismo.** Porto Alegre: AMGH, 2013. V

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência.** Porto Alegre: AMGH, 2014.

HAMBLEY, A. R. **Electrical Engineering, Principles and Applications.** New Jersey: Pearson, 2014.

KHALIL, F. R. **O uso da tecnologia de simulação na prática docente do ensino superior.** XVI Encontro Nacional de Didática e Práticas de Ensino. Campinas: UNICAMP, 2012.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 14. ed. Rio de Janeiro: Globo, 2000.

LODER, L. L.; BENDER, F. A. **O uso de programas de simulação em cursos de engenharia: possibilidades e necessidades.** Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2007.

MARCHETTO FILHO, G.; PINHEIRO, D. D.; CARATI, E. G. Ambiente de Simulação de Acionamento de Motores de Indução com Controle Vetorial. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2016.**

MELO, B. M. S. **Modelagem e Simulação de uma Máquina Elétrica de Corrente Contínua levando-se em Consideração os Efeitos de Reação de Armadura.** São Paulo: Dissertação de Mestrado, 2006.

PEREIRA, L. S.; MONTENEGRO, L. C.; AMORA, M. A. B.; MACHADO, I. R. Melhorias Pedagógicas nas Disciplinas de Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia e Máquinas Síncronas. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2016.**

YILDIZ, A. B. **Electrical equivalent circuit based modeling and analysis of direct current motors.** International Journal of Electrical Power and Energy Systems, n. 43, p. 1043-1047, Jun. 2012.



PEREIRA, L. S. et al. Melhorias Didáticas nas Disciplinas de Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia e Máquinas Síncronas. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Apresentação Oral. Porto Alegre, 2016.