

SIMUMAQ: uma ferramenta desenvolvida em JAVA para simulação de Máquinas de Indução Trifásicas em contexto educacional

Silva, Carolina F. * Ferreira, Flávia M. F. **
Parma, Gustavo G. *** Batalha, Rose Mary S. ****

* Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais, MG, (e-mail:
carolinafernanda26@hotmail.com).

** Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais, MG, (e-mail:
flaviamagfreitas@gmail.com)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade
Católica de Minas Gerais, MG, (e-mail: gustavo.parma@gmail.com)

**** Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais, MG, (e-mail:
batalha@pucminas.br).

Abstract: This article presents the Simumaq, a software for three-phase induction machine (MIT), implemented in Java, developed to assist teachers and students in the process of learning. The computer program allows to simulate the permanent regime, the transient during a direct start and the vectorial speed control, allowing the visualization of graphs such as speed, conjugate, voltages, currents, among others. In this article, the identification of the problem and the motivation for preparing the software for didactic and educational purposes are initially presented. It is presented, then, a study of the electric induction machine by the analysis of its phasor equivalent circuit, the dynamic mathematical modeling in the reference axes $\alpha - \beta$ and the development of the velocity used vector control. The computer program was coded using the Java language, with Netbeans. Such resources were chose due to the available development possibilities, extensive documentation and because it is a free tool. The validation of the software is performed by comparing the results obtained by simulating the software with those mathematically expected.

Resumo: No presente artigo é apresentado o Simumaq, um software de simulação de máquinas elétricas de indução trifásicas (MIT), implementado em Java, desenvolvido para auxiliar professores e alunos no processo de aprendizado. O programa computacional permite simular o regime permanente, o transitório em uma partida direta e o controle vetorial de velocidade, fornecendo a visualização de gráficos como velocidade, conjugado, tensões, correntes entre outros. Neste artigo, inicialmente são identificados o problema e a motivação para elaboração de um *software* com fins didáticos e educacionais. É apresentado, então, um estudo da máquina elétrica de indução pela análise de seu circuito equivalente fasorial, o modelamento matemático dinâmico nos eixos de referência $\alpha - \beta$ e o desenvolvimento do controle vetorial de velocidade utilizado. O programa foi codificado utilizando a linguagem Java, com o Netbeans. Optou-se por tais recursos devido às possibilidades de desenvolvimento disponíveis, ampla documentação e por se tratar de uma ferramenta gratuita. A validação do programa é realizada comparando-se os resultados obtidos pela simulação do *software* com aqueles matematicamente esperados.

Keywords: Electric induction machines; Simulation software; Permanent regime; Transient during direct start; Vector control

Palavras-chaves: Máquinas elétricas de indução; ; Software de simulação; Regime permanente; Transitório durante partida direta; Controle vetorial

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pinto (2012), apesar da expansão dos cursos superiores, consequentemente do curso de engenharia, a quantidade de engenheiros que se formam é insuficiente em relação à demanda do mercado. Esse autor afirma que os profissionais recém-formados não estão apresentando as competências exigidas pelas indústrias e empresas. Seria necessário formar 60 mil engenheiros anualmente no Brasil para que a demanda fosse suprida, contudo apenas se formam 32 mil engenheiros (Gomez et al., 2015). Em uma outra pesquisa é prevista a falta de engenheiros no mercado e o impacto na economia do país (Almeida, 2019).

Em um estudo de caso realizado por Reis et al. (2012) no CEFET/RJ, entre os anos de 2008 e 2010, foram levantados os principais motivos para evasão nos cursos de engenharia. A pesquisa aponta que 14% dos alunos abandonaram a faculdade devido a “desmotivação para o estudo em virtude das práticas tradicionais de ensino”. Anualmente cerca de 20% dos alunos evadem das Instituições de Ensino Superiores (IES) privadas, conforme afirma Christo et al. (2018), um dado alarmante e que pode desencadear consequências negativas tanto para o curso quanto para a faculdade. No primeiro trimestre de 2018, o Conselho Nacional de Educação (CNE) recebeu uma proposta de atualização das diretrizes curriculares para os cursos de engenharia. O documento formulado pela Mobilização Empresarial pela Inovação (MEI) e pela Associação Brasileira de Educação em Engenharia (Abenge) (EDUCAÇÃO, 2019) propõe mudanças na formação base e desenvolvimento de competências do discente. As diretrizes gerais desse programa de disciplinas incentivam as ideias que contemplem novos meios de apresentar os conteúdos para os alunos, indo ao encontro de aprimorar as práticas de ensino já ultrapassadas, empregando diferentes métodos a fim de potencializar a instrução em engenharia.

Alguns trabalhos apresentam a construção de ferramentas que auxiliam no ensino de matérias na engenharia, como por exemplo a obra de Teixeira Pereira et al. (2009), que propõe o desenvolvimento de um programa computacional com uma interface amigável e a análise completa do motor de indução trifásico em regime transitório e permanente. A linguagem utilizada para o desenvolvimento do programa foi o Java pela facilidade na criação de interfaces e a proximidade com a linguagem “C”. Já no trabalho de Costa-Junior et al. (2010) tem-se o modelamento da máquina em 3D, tendo como foco auxiliar o aprendizado do motor elétrico possibilitando aos alunos navegar pela máquina em realidade virtual. Geaquinto e Assunção (2006) apresentam um algoritmo com interface gráfica para simulação do motor de indução trifásico desenvolvido no Matlab®. A interface de entrada de dados elaborada destaca-se pela dinamicidade e explicação dos componentes do circuito da máquina. Outros artigos também trazem a proposta de estudos e desenvolvimento de *softwares* de simulação de máquinas elétricas, tanto para fins educacionais, como por exemplo Porobic et al. (2017), quanto para aplicações específicas como fizeram Aiello et al. (2018), Mojlish et al. (2017), Jandaghi e Dinavaho (2019).

O *software* desenvolvido no presente trabalho tem como foco o fácil acesso pelos alunos, didaticidade e ser uma ferramenta de apoio para os professores, proporcionando análises da velocidade, tensões, correntes, potências entre outras variáveis e permitindo a visualização gráfica desses eventos. A elaboração dessa interface cumpre o objetivo de inovar na metodologia de ensino, apresentando alternativas de aprendizado com o uso da tecnologia, podendo ser utilizada em diversas matérias como eletromagnetismo, máquinas elétricas, acionamentos elétricos, circuitos elétricos, entre outras.

2. CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR

A análise em regime permanente do motor é realizada pelo modelo de circuito equivalente, conforme Umans et al. (2014), e para a análise proposta no presente artigo algumas considerações são necessárias:

- O motor de indução trifásico se caracteriza por possuir enrolamentos distribuídos, equilibrados e simétricos no estator.
- Os enrolamentos possuem a mesma quantidade de espiras.
- As fases são espaçadas por 120° ao longo do perímetro do estator.

Na Figura 1 é possível observar o circuito equivalente do motor de indução trifásico mostrado por fase.

Aplicando a Lei das malhas de *Kirchhoff* tem-se:

$$I_1 = I_2 + I_M \quad (1)$$

Onde:

- I_1 - Corrente da malha de estator
- I_2 - Corrente da malha de rotor
- I_M - Corrente de Magnetização

2.1 Cálculo das Correntes

Para a simulação do regime permanente, adota-se o equivalente de *Thevenin* da mesma forma que Del Toro (1994).

Analisando o circuito, obtém-se as equações:

$$V_{th} = \frac{X_m}{\sqrt{r_1^2 + (X_m + x_1)^2}} V_1 \quad (2)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m(r_1 + jx_1)}{r_1 + j(X_m + x_1)} \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + r_2/s)^2 + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (4)$$

Onde:

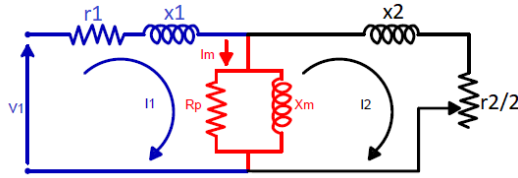


Figura 1. Circuito elétrico equivalente por fase.

V_{th}	- Tensão equivalente de Thévenin
R_{th}	- Valor da resistência de Thévenin
X_{th}	- Valor da reatância de Thévenin
X_m	- Reatância de magnetização
x_1	- Reatância elétrica do estator
x_2	- Reatância elétrica do rotor
r_1	- Resistência elétrica dos enrolamentos do estator
r_2	- Resistência elétrica dos enrolamentos do rotor
S	- Escorregamento do motor

O conjugado pode ser calculado por:

$$T = \frac{1}{\omega_s} \frac{3r_2 V_{th}^2}{[(R_{th} + r_2/s)^2 + (X_{th} + x_2)^2]} \quad (5)$$

Sendo ω_s a velocidade angular síncrona.

Com o escorregamento (S) na partida do motor com valor igual a 1, o conjugado de partida pode ser calculado através da equação:

$$T_p = \frac{1}{\omega_s} \frac{3r_2 V_{th}^2}{[(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2]} \quad (6)$$

E o torque máximo:

$$T_{max} = \frac{1}{2\omega_s} \frac{3V_{th}^2}{[R_{th} + \sqrt{(R_{th}^2 + (X_{th} + x_2)^2)}]} \quad (7)$$

A corrente de estator é dada pela equação:

$$I_1 = \frac{\sqrt{(r_1)^2 + (X_m + x_1)^2}}{x_m \sqrt{(R_{th} + r_2/s)^2 + (X_{th} + x_2)^2}} V_{th} \quad (8)$$

2.2 Cálculo das Potências

De acordo com a análise do circuito equivalente realizada por Umans et al. (2014), a potência transferida pelo estator pode ser encontrada por:

$$P_g = 3 \frac{r_2}{s} I_2^2 \quad (9)$$

A potência dissipada na resistência r_2 , corresponde à potência mecânica útil ou potência mecânica desenvolvida, dada por:

$$P_u = 3 \frac{r_2}{s} I_2^2 (1 - s) \quad (10)$$

A potência mecânica de saída do eixo do motor é representada por:

$$P_s = T \omega_s (1 - s) \quad (11)$$

A velocidade elétrica é encontrada através da equação:

$$\omega = 2\pi n s \quad (12)$$

Onde n é a velocidade mecânica e n_s a velocidade síncrona, ambas em *rpm*. É possível encontrar o escorregamento com a seguinte equação:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (13)$$

O valor de n_s pode ser encontrado através da equação:

$$n_s = \frac{120}{P} \cdot f \quad (14)$$

Sendo P o número de polos e f a frequência da rede elétrica em Hz.

A modelagem matemática acima foi utilizada para elaboração do algoritmo de simulação do regime permanente da máquina, ressaltando que essa simulação é realizada sem carga no eixo e que os resultados são dependentes do número de amostras requerido e informado pelo usuário. O número de amostras é responsável pela quantidade de vezes que as variáveis serão calculadas. Para exemplificar, caso o usuário informe que o valor de amostras será 10, então teremos apenas 10 valores calculados para cada variável ao longo da simulação.

3. MODELO DINÂMICO DA MIT

Este trabalho utiliza a modelagem ortogonal que facilita a implementação da lógica algorítmica e algébrica no programa computacional. Segundo Gasparetto (2006) a modelagem matemática tem por fim promover a verificação do comportamento temporal transitório das variáveis do equipamento. No modelo ortogonal, substituímos o tradicional modelo trifásico, com eixos defasados de 120° entre si, por um sistema ortogonal com 2 eixos defasados em 90° entre si, como apresentado na Figura 2.

As principais equações da máquina de indução com o referencial no estator descritas de forma ortogonais *alpha-beta*, de acordo com Gasparetto (2006), são:

$$V_{s\alpha\beta} = R_s i_{s\alpha\beta} + \frac{d}{dt} \lambda_{s\alpha\beta} \quad (15)$$

$$V_{R\alpha\beta} = R_R i_{R\alpha\beta} + \frac{d}{dt} \lambda_{R\alpha\beta} \quad (16)$$

$$\lambda_{s\alpha\beta} = L_S i_{s\alpha\beta} + L_M i_{R\alpha\beta} \quad (17)$$

$$\lambda_{R\alpha\beta} = L_R i_{R\alpha\beta} + L_M i_{s\alpha\beta} \quad (18)$$

Os fluxos são calculados pela Equação 19.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha S} \\ \lambda_{\beta S} \\ \lambda_{\alpha R} \\ \lambda_{\beta R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_S a_1 & 0 & R_S a_2 & 0 \\ 0 & -R_S a_1 & 0 & R_S a_2 \\ R_R a_2 & 0 & -R_R a_3 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_R & -R_R a_3 \end{bmatrix}$$

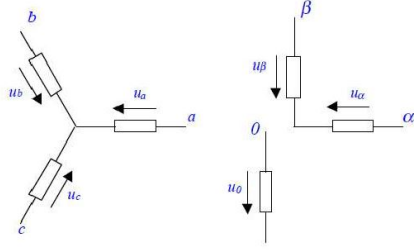


Figura 2. Representação dos sistemas de coordenadas trifásico e ortogonal

$$\begin{bmatrix} \lambda_{\alpha S} \\ \lambda_{\beta S} \\ \lambda_{\alpha R} \\ \lambda_{\beta R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\alpha S} \\ V_{\beta S} \\ V_{\alpha R} \\ V_{\beta R} \end{bmatrix} \quad (19)$$

E as correntes:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha S} \\ i_{\beta S} \\ i_{\alpha R} \\ i_{\beta R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \lambda_{\alpha S} - a_2 \lambda_{\alpha R} \\ a_1 \lambda_{\beta S} - a_3 \lambda_{\beta R} \\ a_3 \lambda_{\alpha R} - a_2 \lambda_{\alpha S} \\ a_3 \lambda_{\beta R} - a_2 \lambda_{\beta S} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Onde:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{L_R}{L_S L_R - L_M^2} \\ a_2 &= \frac{L_M}{L_S L_R - L_M^2} \\ a_3 &= \frac{L_S}{L_S L_R - L_M^2} \end{aligned}$$

E a equação de velocidade:

$$\omega_{(k)} = \left(\frac{J}{J + T.b} \right) \cdot \omega_{(k-1)} + \left(\frac{J}{J + T.b} \right) \cdot \left(\frac{T.P}{2J} \right) \cdot (T_{e(k)} - T_{L(k)}) \quad (21)$$

As variáveis são:

R_R	- Resistência de rotor por fase
R_S	- Resistência de estator por fase
L_R	- Indutância de rotor por fase
L_S	- Indutância de estator por fase
L_M	- Indutância de magnetização das três fases
J	- Momento de inércia do rotor
ω	- Velocidade angular mecânica
b	- Coeficiente de atrito viscoso
P	- Número de Polos
T_L	- Torque de carga
T_e	- Torque da máquina

O método de discretização do tipo *Backward difference* é utilizado para realizar os cálculos necessários, reduzindo a complexidade, conforme Barros et al. (2018). O modelo matemático descrito nesta seção será utilizado para a simulação da partida direta e para o controle vetorial.

4. CONTROLE VETORIAL DE VELOCIDADE DA MIT

Segundo Jacobina and Lima (1996), as estratégias de controle de fluxo e conjugado podem ser classificadas como

estratégias escalares ou vetoriais. No programa computacional desenvolvido optou-se por realizar o controle vetorial do tipo direto, utilizando como referência o fluxo estatórico e buscando um desacoplamento entre o controle de torque e de velocidade, fazendo com que a MIT atue próximo ao funcionamento de uma máquina CC. Para fins de maior simplificação é utilizada a transformação $d-q-0$, a qual trata o enrolamento rotórico girante como rotórico pseudoestacionário, transformando um conjunto de enrolamentos girantes em um conjunto de enrolamentos fixos, como descrito por Barros et al. (2018) e demonstrado na Figura 3. Assim, pode-se posicionar os eixos de uma forma que facilite a elaboração das equações e da lógica de programação para desenvolvimento do *software*. Será necessária, pois, a transformação das variáveis de tensão, fluxo e corrente de $\alpha - \beta$ para $d-q-0$.

Opta-se pelo posicionamento do eixo d de uma forma que coincida com a direção do vetor de fluxo do estator θ_s . Na Figura 4 há um alinhamento do fluxo do rotor com o eixo d , logo o fluxo do estator converge apenas ao eixo d . Através desse alinhamento pode-se afirmar que $\omega = \omega_s$, consequentemente conclui-se que o sistema de coordenadas está girando à mesma velocidade do campo girante. Daí a ideia do enrolamento rotórico pseudoestacionário, pois dá-se a impressão que o sistema do campo girante está parado.

O comportamento do motor de indução em coordenadas $d-q$ é:

$$V_{qS} = R_S i_{qS} + \frac{d\lambda_{qS}}{dt} + \omega \lambda_{dS} \quad (22)$$

$$V_{dS} = R_S i_{dS} + \frac{d\lambda_{dS}}{dt} + \omega \lambda_{qS} \quad (23)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (24)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (25)$$

Os fluxos:

$$\lambda_{qS} = L_S i_{qS} + L_M i_{qr} \quad (26)$$

$$\lambda_{dS} = L_S i_{dS} + L_M i_{dr} \quad (27)$$

$$\lambda_{qr} = L_R i_{qr} + L_M i_{qS} \quad (28)$$

$$\lambda_{dr} = L_R i_{dr} + L_M i_{dS} \quad (29)$$

O torque será:

$$T_e = 1,5P(\lambda_{dS} i_{dS} - \lambda_{qS} i_{qS}) \quad (30)$$

A orientação do controle será feita pelo campo do estator, com isso a variável λ_{qS} será anulada, como mostrado nas equações 31 e 32.

$$0 = L_S i_{qS} + L_M i_{qr} \quad (31)$$

$$i_{qS} = -\frac{L_M i_{qr}}{L_S} \quad (32)$$

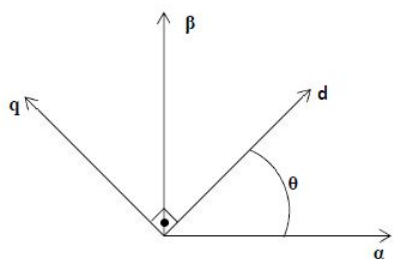


Figura 3. Relação entre sistema $\alpha - \beta$ e $d-q$

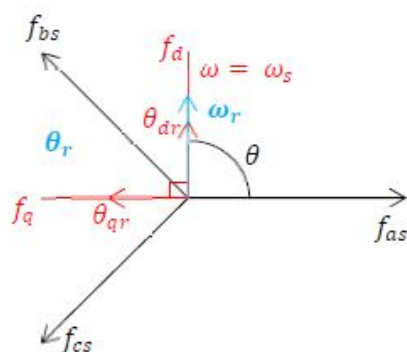


Figura 4. Alinhamento do fluxo do rotor com o eixo d.

Assim, ao manter o fluxo λ_{ds} constante, pode-se controlar o torque da máquina através da corrente de quadratura do estator, e conseqüentemente, utilizando a tensão de quadratura do estator. A desvantagem deste método de orientação é que não é possível alcançar um completo desacoplamento dos eixos de quadratura, uma vez que o fluxo do eixo direto do estator depende das correntes de quadratura, segundo Gasparetto (2006). Será utilizado um controlador do tipo PI para diminuir a interação dos eixos.

De acordo com Reginatto (1993), o controle vetorial pode ser classificado de acordo com a referência utilizada no sistema de coordenadas de campo. O controle de velocidade do tipo direto faz a medição direta da posição angular do vetor, enquanto que no controle do tipo indireto essa informação é obtida através de um cálculo do escorregamento do motor. Neste trabalho foi utilizado o controle orientado direto, representado na Figura 5. O usuário informará a velocidade ω_r de referência juntamente com o fluxo de estator λ_s . Tanto a velocidade quanto o fluxo são valores comparados com estados anteriores medidos, gerando o erro que é implementado no controlador do tipo PI. O ramo relacionado ao fluxo entrega o valor de tensão no eixo d , e o ramo referente à velocidade, em conjunto com o torque, entrega o valor de tensão no eixo q . Por último, os valores de referência $d - q$ são convertidos para os eixos de referência $\alpha - \beta$.

Neste trabalho o controle vetorial desenvolvido tem como base o motor detalhado na Tabela 1. Os valores dos ganhos dos controladores foram gerados para o modelo do motor apresentado e estudado no trabalho de Parma (2000). Apesar da disponibilidade de simulação de apenas uma máquina, diversos conceitos podem ser analisados

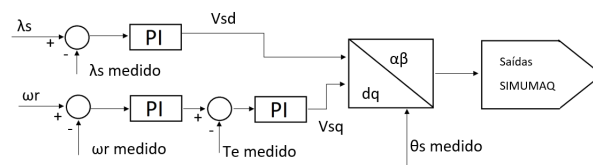


Figura 5. Implementação do fluxo do rotor de forma direta.

tais como a reação da máquina em termos de tensões, correntes, velocidade e outras variáveis, ao aplicar uma carga ou inverter a rotação, servindo como uma excelente ferramenta didática para alunos e docentes.

Tabela 1. Dados do motor simulado no Controle Vetorial

Tensão de alimentação [V] - ligação Δ/Y	92.4/160
Corrente Nominal[A] - ligação Δ/Y	14.4/8.3
Potência [CV]	2.0
Velocidade Nominal [rpm]	1715
Resistência de estator[Ω]	0.995
Indutância de dispersão de estator [H]	2.362E-03
Resistência de rotor [Ω]	0.696
Indutância de dispersão de rotor [H]	3.525E-03
Indutância de Magnetização [H]	45.601E-03
Coefficiente de perdas rotacionais [$W \cdot s^2/rad^2$]	8.718E-04
Momento de Inércia [$N.m.s^2$]	6.547E-03

5. DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA

Java foi a linguagem escolhida para o desenvolvimento do *software* e dentre os principais motivos da escolha encontram-se a gratuidade do programa e a aplicabilidade da linguagem em diversos ambientes de desenvolvimento (*Integrated Development Environment* - IDE). As IDEs servem como ferramentas de apoio ao desenvolvedor de *software*, facilitando e tornando a elaboração de códigos mais rápida e intuitiva. Para elaboração do *software* proposto neste trabalho utiliza-se a IDE Netbeans, que fornece uma gama de recursos, como por exemplo: itens de barra, ferramentas, atalhos de teclado, gerenciamento de janelas, interface amigável entre muitas outras ações que economizam tempo e permitem que o desenvolvedor consiga se dedicar à lógica do programa e ao mesmo tempo alcançar uma interface amigável e moderna. A Netbeans é gratuita e de código aberto, ou seja, permite a modificação e otimização do *software* original. O *software* intitulado "SIMUMAQ" oferece em sua interface a oportunidade de se trabalhar com a máquina em regime permanente, de se analisar o transitório na partida direta e de se realizar o controle vetorial de velocidade. A tela inicial do programa está representada na Figura 7.

A entrada de dados do motor é realizada manualmente. É importante que todos os dados sejam inseridos para então dar início à simulação. É possível realizar a visualização de alguns gráficos disponíveis durante a simulação. Dentro da imagem do gráfico pode-se alterar cores de fundo da imagem, colocar legendas, alterar título, utilizar o recurso de zoom e salvar o gráfico no computador do usuário. Além disso ao clicar no botão "Gravar" é gerado um arquivo *txt*, e ao importar esse arquivo em alguma ferramenta de planilhas tem-se a possibilidade de geração de diferentes análises dos resultados. Limpando a área de dados pode-

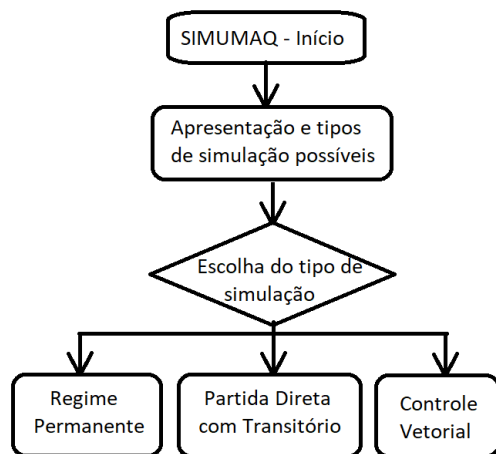


Figura 6. Fluxograma do processo de simulação.

Software de Simulação de Máquinas Elétricas



Figura 7. Página inicial do programa.

se iniciar uma nova simulação, ou o usuário pode optar por voltar ao início para começar uma nova experiência.

Os valores resultantes da simulação em Regime Permanente são: escorregamento, fator de potências, velocidade (rpm e rad/s), correntes (estator e rotor), conjugado mecânico, potências (entrada, saída, estator e útil), rendimento e fator de potência.

Os valores resultantes da simulação de Partida direta com transitório são: tempo, conjugado mecânico, velocidade (rpm e rad/s), tensões trifásicas, correntes trifásicas, tensões $\alpha - \beta$, fluxo $\alpha - \beta$ (estator e rotor).

Tempo, Conjugado Mecânico, Velocidade em RPM, Velocidade em rad/s, Tensões: VSA, VSB e VSC, Correntes: I1, I2 e I3, Tensões alfa-beta, Fluxo de estator alfa-beta, Fluxo de rotor alfa-beta

Na simulação de controle vetorial, é importante lembrar que o *software* disponibiliza um modelo específico de motor com os dados já inseridos, sendo possível então simular essa máquina e analisar os gráficos e valores ofertados, alternando entre motor com carga, sem carga e inversão de sentido de giro do eixo da máquina.

6. SIMULAÇÃO E TESTES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando-se as opções de simulação do *software* desenvolvido.

6.1 Simulação Regime Permanente

Nesse modo de simulação é possível observar os gráficos de velocidade *versus* fator de potência, velocidade *versus* rendimento, velocidade *versus* corrente I1 e velocidade *versus* torque. Além disso, com a função de gravar dados em um arquivo .txt é possível gerar outros gráficos com diferentes variáveis.

O motor tem os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados do motor simulado no Regime Permanente

Tensão Eficaz	220 V
Resistência do Estator	5,435 Ω
Resistência do Rotor	6,112 Ω
Reatância do Estator	1,863 Ω
Reatância do Rotor	2,389 Ω
Reatância de Magnetização	75,787 Ω
Frequência	60 Hz
Polos	4 unid.
Velocidade RPM	1750 rpm
Rendimento	89,1%
Fator de potência	0,87
$(\frac{I_p}{I_n})$	4,4

A simulação é realizada variando o valor de escorregamento de 1 a 0. O intervalo entre um ciclo de cálculos e outro é determinado em relação a quantidade de amostras que o usuário inserir. A Figura 8 apresenta um gráfico de velocidade *versus* rendimento, no qual é possível observar que o maior rendimento alcançado pela máquina é aproximadamente 89,1%, que ocorre no exato momento em que a máquina atinge o valor de velocidade nominal. A título de exemplo, foi mostrada na Figura 9 a curva de velocidade *versus* conjugado de onde se extrai o valor de torque máximo que o motor pode desenvolver, neste caso um valor próximo a 57,9 N.m.

6.2 Simulação da partida direta com Transitório

Na simulação da partida direta com transitório, o programa computacional Simumaq oferece a visualização dos gráficos das tensões trifásicas (vsa, vsb e vsc), as correntes trifásicas (i_1 , i_2 e i_3), torque, velocidade, tensões $\alpha - \beta$ e fluxos $\alpha - \beta$. Os dados do motor utilizado para gerar os gráficos de Partida direta com transitório para este trabalho são apresentados na Tabela 3.

A Figura 10 acompanha a curva de tempo *versus* velocidade, na qual é possível observar o transitório da velocidade após o instante 0 e se estabilizando em 1715 rpm. Acompanhando a curva de torque *versus* tempo apresentada na Figura 11, pode-se observar o transitório do torque durante a partida até a entrada no regime permanente. A máquina demora aproximadamente 0,45 segundos para se estabilizar e apresenta um conjugado de 4 N.m no regime.

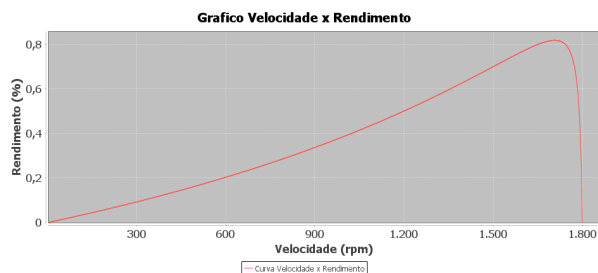


Figura 8. Gráfico de Velocidade *versus* Rendimento - Regime permanente.

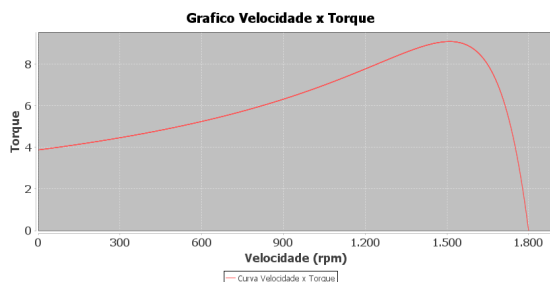


Figura 9. Gráfico de Torque *versus* Velocidade - Regime permanente.

6.3 Simulação Controle Vetorial

Os dados do motor utilizados para análise do controle vetorial foram apresentados na Tabela 1. O controle deste motor é para a velocidade elétrica de referência de 150 rad/s. Nesta simulação é possível aplicar ou retirar a carga e inverter o sentido de giro do eixo do motor. Os gráficos gerados para visualização são das tensões trifásicas (v_{sa} , v_{sb} e v_{sc}), correntes trifásicas (i_{1l} , i_{2l} e i_{3l}), fluxos $d-q$, torque, velocidade e os fluxos $\alpha-\beta$.

A curva apresentada na Figura 12 mostra os fluxos $d-q$ em quadratura. O fluxo q com valor 0 e o fluxo d com valor próximo à 0,21, que é exatamente o valor informado pelo usuário. No tempo 2,0s ocorre a inversão do sentido de giro do motor. Como apontado na equação 30, o torque e o fluxo são diretamente proporcionais, apesar da utilização do controlador PI para minimizar o efeito desse acoplamento, ainda é possível observar um pequeno deslocamento do fluxo d no instante em que o torque é alterado. Na Figura 13, tem-se o gráfico extraído na simulação com inversão de sentido de giro e pode-se notar que o torque tem um valor negativo no tempo de 2s, mas como a máquina está a vazio, volta-se ao valor 0. O valor

Tabela 3. Dados do motor simulado na partida direta com transitório

Tensão Eficaz	220 V
Resistência do Estator	4,08 Ω
Resistência do Rotor	4,87 Ω
Indutância do Estator	0,3154 H
Indutância do Rotor	0,3235 H
Indutância Mútua	0,305 H
Momento de Inércia	0,018 N.m.s ²
Fator de Atrito	0 Ws ² /rad ²
Frequência	60 Hz
Polos	4 unid.
Carga	4 N.m

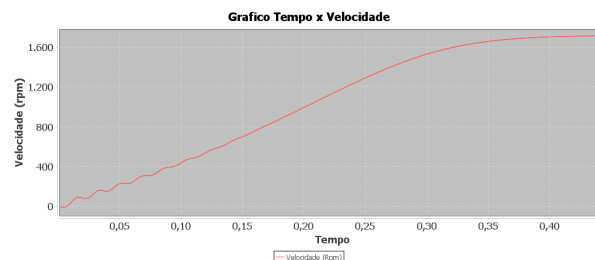


Figura 10. Gráfico Tempo *versus* Velocidade - Transitório.

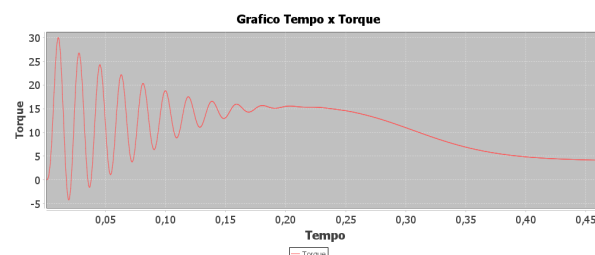


Figura 11. Gráfico Torque *versus* Tempo - Transitório.

negativo de torque atingido pela máquina representa o momento da inversão de sentido de giro, uma vez que nesse instante as fases são invertidas e a força resultante do campo eletromagnético mudará de estado. Instantes após a inversão no sentido de giro a carga volta ao valor de 0, ou seja, o motor se estabiliza novamente.

As simulações apresentadas nesta seção podem ser aplicadas dentro de sala de aula pelos professores, fomentando entre os alunos o interesse prático pela matéria, podendo propor cenários reais nos quais os discentes analisariam dados sugerindo soluções e aplicando essas soluções no programa.

7. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta que servisse de apoio para estudante e docentes durante o aprendizado de máquinas elétricas. Dados e estudos são apresentados como forma de identificar o problema de evasão e desmotivação dos estudantes de engenharia com as formas arcaicas de ensino. O intuito de elaborar um *software* de simulação passa pela motivação de aliar a tecnologia com a teoria e propor outras formas de estudo e aprendizado, envolvendo alunos e professores em dinâmicas diferentes de metodologia de ensino.

Apesar do resultado encontrado com a ferramenta ser satisfatório, ainda existe uma gama de possibilidades de experimentos e melhorias a serem realizadas, como por exemplo verificar a aplicação de tal conteúdo como ferramenta educacional através da utilização deste por alunos e professores da área de engenharia e a implementação da simulação de diferentes modelos de máquinas elétricas.

REFERÊNCIAS

Aiello, G.; Scelba, G.; Scarcella, G.; Cacciato, M.; Tornello, L.; Palmieri, A.; Vanelli, E.; Pernaci, C.; e Di Dio, R. Real-Time Emulation of Induction Machines for Hardware in the Loop Applications. In *2018 International*

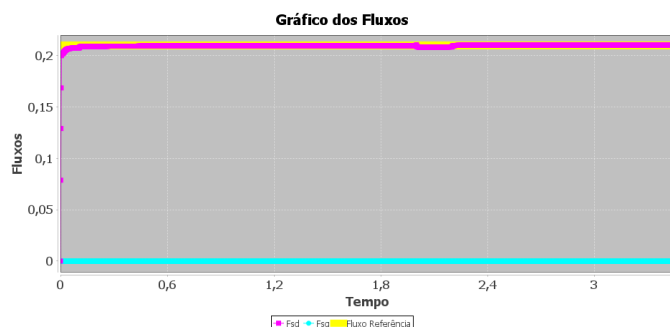


Figura 12. Curva dos Fluxos $d-q$ - Controle Vetorial.

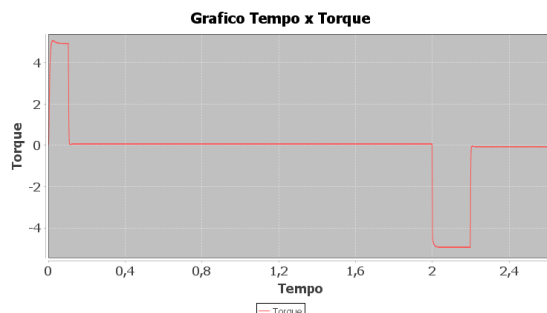


Figura 13. Tempo *versus* Torque com inversão de sentido de giro - Controle Vetorial.

Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, 2018, pp. 1340-1345, doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445326.

Almeida, Lucas de. **Engenheiros e crescimento econômico: Evidências empíricas do impacto da quantidade de engenheiros no crescimento econômico dos estados**. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Econômicas, Programa de Pós-graduação em Ciências Econômicas, Universidade de Brasília - Unb, Brasília, 2019.

Barros, Rodrigo Cassio de; Ribeiro, Wesley Venancio; Pereira, Heverton Augusto; Cupertino, Allan Fagner Métodos de discretização aplicados no detector de corrente harmônica baseado na estrutura da SOGI-PLL: Um estudo comparativo. In *Vii Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado, Rs, 2018.

Christo; Resende; e Kuhn. Por que os alunos de engenharia desistem em seus cursos - Um estudo de caso. In *Revista Eletrônica do Programa de Pós-graduação em Educação e do Departamento de Educação da Faculdade de Ciências e Tecnologia/UNESP*, São Paulo, v. 29, n. 1, jan. 2018.

Costa-Junior, R. A.; Silva, R. C.; Cerqueira, Christopher Shneider; Almeida, A. T. L.. Realidade Aumentada para Auxiliar o Aprendizado de Motor Elétrico. In *Vii Workshop de Realidade Virtual e Aumentada*, Unifei, Itajubá, jan. 2010.

Del-Toro, Vicente. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994. 574 p. Tradução de Onofre de Andrade Martins.

Educação, Ministério da Educação Conselho Nacional de. **Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia**. Distrito Federal: Conselho Nacional de Educação/câmara de Educação Superior, 2019. Processo 23001.000141/2015-11.

Gasparetto, Radamés. **Projeto de Conclusão Controle Vetorial do Motor de Indução**. 62 f. TCC (Doutorado) - Curso de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

Geaquino e Assunção. Desenvolvimento de um algoritmo para a simulação do motor de indução trifásico. In *Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-graduação do Ita - Xii Encita / 2006: Instituto Tecnológico de Aeronáutica*, São José dos Campos, out. 2006.

Gomez; Remor; Marco, D.; e Betzek. Evasão na engenharia: O caso dos cursos da UTFPR campus medianeira tendo como acesso o SISU. In *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Medianeira*, Paraná, v. 11, n. 1, p. 73-89, 2015.

Jacobina, Lima. Estratégias de controle para sistemas de acionamento com máquina assíncrona. In *Sba Contole Automação*, Campina Grande, Pb, v. 7, n. 1, p. 15-28, abr. 1996.

B. Jandaghi e V. Dinavahi. Real-Time HIL Emulation of Faulted Electric Machines Based on Nonlinear MEC Model. In *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1190-1199, Sept. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2891560.

S. Mojlish; N. Erdogan; D. Levine e A. Davoudi. Review of Hardware Platforms for Real-Time Simulation of Electric Machines. In *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 130-146, March 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2656141.

Parma, Gustavo Guimarães. **Treinamento de redes neurais artificiais baseado em sistemas de estrutura variável com aplicações em acionamentos elétricos**. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais - Ufmg, Belo Horizonte, 2000.

Pereira, Everton; Lyra, A.c.c.; Oliveira, Fabio Maurício Sena de; Burian Junior, Yaro. Desenvolvimento de um aplicativo didático para o ensino de estabilidade da máquina síncrona. In *Icece - International Conference On Engineering And Computer Education. Educating Engineers For Innovation*, Buenos Aires, dez. 2009.

Pinto, Harley. Engenheiros, escassos e pouco qualificados. In *Revista Instituto de Educação Tecnológica - Iete*, São Paulo, p. 1-06, dez. 2012.

Porobic, V., Adzic, E., Vekic, M., Grabic, S. e Ivanovic, Z. Educational framework for a motor drive control systems: Design and performance assessment. In *Comput Appl Eng Educ*, S25: 264-276. doi:10.1002/cae.21795

Reginatto, R. **Controle por campo orientado do motor de indução com adaptação de parâmetros via MRAC**. 1993. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

Reis; Cunha; Spritzer. Evasão no ensino superior de engenharia no brasil: Um estudo de caso no CEFET/RJ. In *Xl Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, set. 2012.

Umans, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Amgh Editora Ltda, 2014. 728 p.