

PLATAFORMA VIRTUAL DO CONTROLE ORIENTADO DE CAMPO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO AO ENSINO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Gustavo H. Bazan – gu.bazan@gmail.com

Sérgio C. Mazucato Jr. – sergiomazucato@gmail.com

Marcelo F. Castoldi – marcastoldi@utfpr.edu.br

Danilo S. Sanches – danilosanches@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica
Avenida Alberto Carazzai, 1640

86300-000 – Cornélio Procópio - Paraná

William C. A. Pereira – william.andrade@usp.br

Manoel L. Aguiar – aguiar@sc.usp.br

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Trabalhador São-carlense, 400

13566-590 – São Carlos – São Paulo

Resumo: *Este trabalho propõe uma plataforma virtual aplicada ao ensino, a alunos de graduação, de uma técnica de acionamento de motores de indução trifásicos (MIT). A técnica de acionamento conhecida como Controle de Campo Orientado (Field Oriented Control – FOC) é apresentada e analisada, de uma maneira simples, usando a plataforma proposta. Tal plataforma utiliza a ferramenta GUIDE do MATLAB juntamente com o SIMULINK. Os resultados simulados da estratégia FOC e a simplicidade do uso da plataforma são mostrados neste artigo.*

Palavras-chave: *Ensino, Educação, Alunos, Motor de Indução, FOC.*

1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são divididos de acordo com o tipo de alimentação e podem ser classificados, basicamente, em duas categorias: Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA). No entanto, o uso de motores CC tem desvantagens relativas às suas características construtivas (KRISHNAN, 2001; AMIN, 2010).

A máquina de indução trifásica (MIT) também conhecida por motor assíncrono trifásico é um motor CA amplamente usado na indústria devido a suas vantagens quando comparado com outras máquinas, tanto CC quanto CA. A MIT é uma máquina que requer pouca manutenção devido ao fato de não possuir escovas e comutador, possuindo também a vantagem do seu baixo custo (TRZYNADLOWSKI, 2000). Desta maneira, no curso de graduação em engenharia elétrica, as disciplinas relacionadas a máquinas elétricas trifásicas estão entre as mais importantes.

No entanto, nos cursos de graduação, as máquinas de indução trifásicas são analisadas, de maneira geral, apenas em regime permanente, não abordando, assim, suas características dinâmicas de acionamento nas disciplinas. Desta forma, o processo de aprendizado pode ser prejudicado, uma vez que os alunos não têm contato com técnicas de controle de máquinas, as quais podem ser necessárias quando este aluno estiver imerso em ambiente industrial.

O acionamento de tais máquinas é um assunto de grande impacto econômico mundial (KUMAR *et al.*, 2012). Existem diferentes métodos para controle de velocidade do MIT, sendo estes métodos classificados, basicamente, em duas categorias: escalar e vetorial (VAS, 1994). O controle escalar manipula apenas a magnitude da grandeza elétrica ou magnética, enquanto o controle vetorial controla tanto a magnitude quanto a posição angular destas grandezas (KRISHNAN, 2001; VAS, 1994).

Uma importante técnica de controle vetorial, foco deste trabalho, é conhecida por Controle de Campo Orientado (*Field Oriented Control - FOC*), apresentada em (BLASCHKE, 1972). Devido a sua complexidade matemática e ao alto custo de microprocessadores, esta técnica foi usada efetivamente somente a partir de 1980 (TRZYNADLOWSKI, 1994). Desde então, esta técnica tem tido um grande impacto no controle de máquinas CA, aumentando a confiabilidade do MIT no estado estacionário e dinâmico.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma plataforma virtual para acionamento e controle de MIT utilizando a técnica de Controle Indireto de Campo Orientado (*Indirect Field Oriented Control - IFOC*) com orientação do campo do rotor para um MIT com rotor gaiola de esquilo.

A plataforma virtual foi feita com auxílio da ferramenta de análise de sistemas dinâmicos do *software* MATLAB/Simulink e tem o intuito de criar uma interface gráfica de fácil acesso e compreensão por parte dos usuários. O principal objetivo da criação desta plataforma virtual de controle é auxiliar a compreensão da técnica de controle discutida, podendo despertar o interesse dos alunos em pesquisas na área de controle de máquinas elétricas.

Os modelos computacionais e as simulações dos motores de indução podem ser utilizadas como ferramentas de ensino, através de gráficos gerados para ilustrar o estado dinâmico de operação do motor sobre diversas características de carga. As ferramentas computacionais podem ser utilizadas, também, como parte de experimentos de laboratório, aprimorando o conhecimento dos estudantes, uma vez que eles podem modificar todos os parâmetros de simulação e analisar os resultados.

2. CONTROLE DE CAMPO ORIENTADO

A modelagem do motor de indução utilizando transformações vetoriais de coordenadas é fundamental para implementar o FOC. Esta técnica de controle é baseada na fixação de um dos três fluxos magnéticos (estator, rotor ou entreferro) no eixo direto do sistema de coordenadas síncronas (coordenadas *dq*). Como mencionado anteriormente, neste trabalho foi utilizada a técnica IFOC com orientação de fluxo do rotor devido a sua grande aplicabilidade na indústria quando comparada com outras estratégias de controle orientado, e devido a sua fácil implementação.

É importante ressaltar que para o desenvolvimento da técnica de controle vetorial é necessário conhecer o modelo matemático do motor de indução. Uma vez que a técnica



IFOC controla ambas as grandezas do estator (tensão e corrente) e rotor (fluxo e velocidade), é interessante adotar um referencial genérico para todas estas grandezas.

Adotando o referencial síncrono é possível encontrar uma representação para o motor de indução de uma maneira similar ao motor CC com excitação independente, facilitando a compreensão da estratégia de controle IFOC aplicada ao MIT. Porém, inicialmente, é necessário saber a modelagem do motor na referência síncrona, as quais são descritas a seguir, de acordo com (ONG, 1997):

$$\vec{u}_{1dq} = R_1 \vec{i}_{1dq} + \frac{d\vec{\psi}_{1dq}}{dt} + j\omega_{m2} \vec{\psi}_{1dq} \quad (1)$$

$$\vec{u}_{2dq} = R_2 \vec{i}_{2dq} + \frac{d\vec{\psi}_{2dq}}{dt} + j(\omega_{m2} - z_p \omega_{mec}) \vec{\psi}_{2dq} \quad (2)$$

$$\vec{\psi}_{1dq} = L_1 \vec{i}_{1dq} + L_H \vec{i}_{2dq} \quad (3)$$

$$\vec{\psi}_{2dq} = L_2 \vec{i}_{2dq} + L_H \vec{i}_{1dq} \quad (4)$$

$$\psi_2 = \sqrt{\psi_{2d}^2 + \psi_{2q}^2} \quad (5)$$

$$m_d = \frac{3}{2} \frac{L_H}{L_2} z_p (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \quad (6)$$

onde,

\vec{u}_{1dq} , \vec{u}_{2dq} : vetor espacial da tensão de estator e de rotor, respectivamente;

\vec{i}_{1dq} , \vec{i}_{2dq} : vetor espacial da corrente de estator e de rotor, respectivamente;

$\vec{\psi}_{1dq}$, $\vec{\psi}_{2dq}$: vetor espacial de fluxo de estator e de rotor, respectivamente;

m_d : torque eletromagnético;

i_{1d} , i_{1q} : componente direta e em quadratura da corrente de estator, respectivamente;

ψ_{2d} , ψ_{2q} : componente direta e em quadratura do fluxo de rotor, respectivamente;

ψ_2 : valor total do fluxo de rotor;

R_1 , R_2 : resistência do estator e do rotor, respectivamente;

L_1 , L_2 , L_H : indutâncias próprias do estator e do rotor e indutância mútua, respectivamente;

z_p : número de pares de polos;

ω_{mec} : velocidade mecânica do rotor;

ω_{m2} : velocidade síncrona.

O modo de operação é baseado no controle simultâneo de duas malhas diferentes, sendo uma de fluxo do rotor e outra de velocidade. A malha de fluxo é responsável pelo acionamento da MIT de acordo com a magnetização desejada. A malha de velocidade, como sugerido pelo nome, é responsável pelo acionamento da MIT de acordo com a velocidade desejada. A Figura 1 exibe de forma simplificada a estratégia de controle proposta.

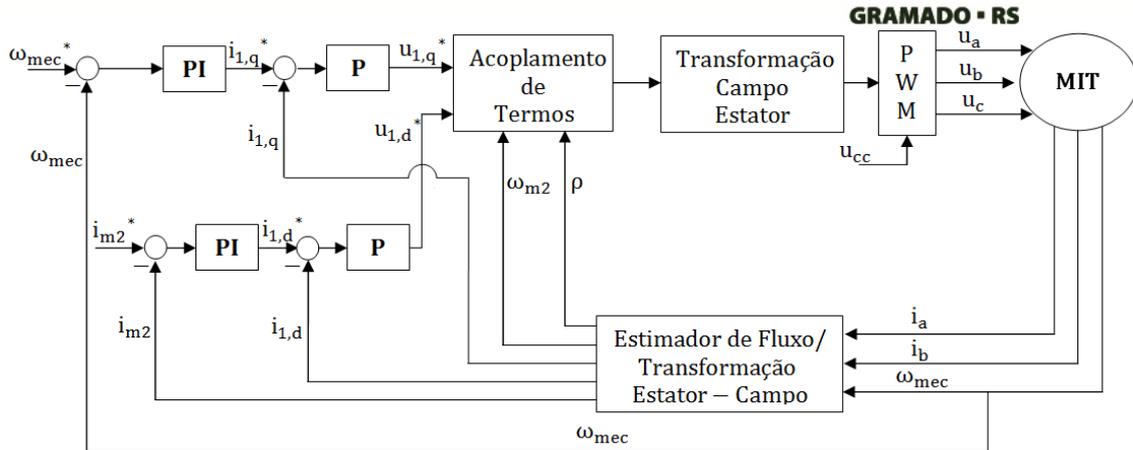


Figura 1. Estrutura IFOC proposta.

Como pode ser visto na Figura 1, a partir dos sinais medidos do motor (corrente de terminal) pode-se calcular os valores das correntes direta e de quadratura do estator e, também, da corrente de magnetização (i_{m2}). Impondo a orientação de ψ_2 no eixo d , tem-se que ψ_2 não possui componente no eixo q e, ainda,

$$\psi_2 \propto i_{m2} \quad (7)$$

Desta forma, no controle vetorial proposto, impõe-se o valor de i_{m2} e, conseqüentemente, de acordo com (7), o valor de ψ_2 . Desta forma, tendo em vista (6), o torque do motor pode ser regulado em função de $i_{1,q}$, como visto a seguir:

$$m_d = \psi_2 i_{1,q} \quad (8)$$

ou seja, o motor de indução se comporta como um motor CC.

Para executar o controle, primeiramente a corrente de magnetização do rotor estimada é comparada com a referência, e um erro é obtido. Tal erro é processado por um controlador Proporcional Integrativo (PI), o qual determina o valor de referência da corrente do estator no eixo direto. Simultaneamente a velocidade do MIT é comparada com a velocidade de referência e um segundo erro é obtido. Este erro também é processado por um controlador PI, o qual determina o valor de referência da corrente do estator em quadratura.

Ambas as componentes das correntes, direta e quadratura, são comparadas com seus valores atuais e o erro resultante passa por um controlador P. Os resultados são os valores de tensão do estator no eixo direto ($u_{1,d}$) e quadratura ($u_{1,q}$). Estes valores são gerados no sistema de coordenadas síncronas (dq) e necessitam ser transformados para o sistema trifásico (abc) para que o controle da MIT seja realizado.

Depois da transformação, um PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*) é usado para gerar o a tensão de fase desejada para realizar o acionamento da máquina.

3. INTERFACE GRÁFICA

A interface gráfica mostrada na Figura 2 é feita em uma linguagem de programação de fácil acesso para ajudar diferentes tipos de usuários, de iniciantes a usuários avançados, no uso da técnica de controle abordada.

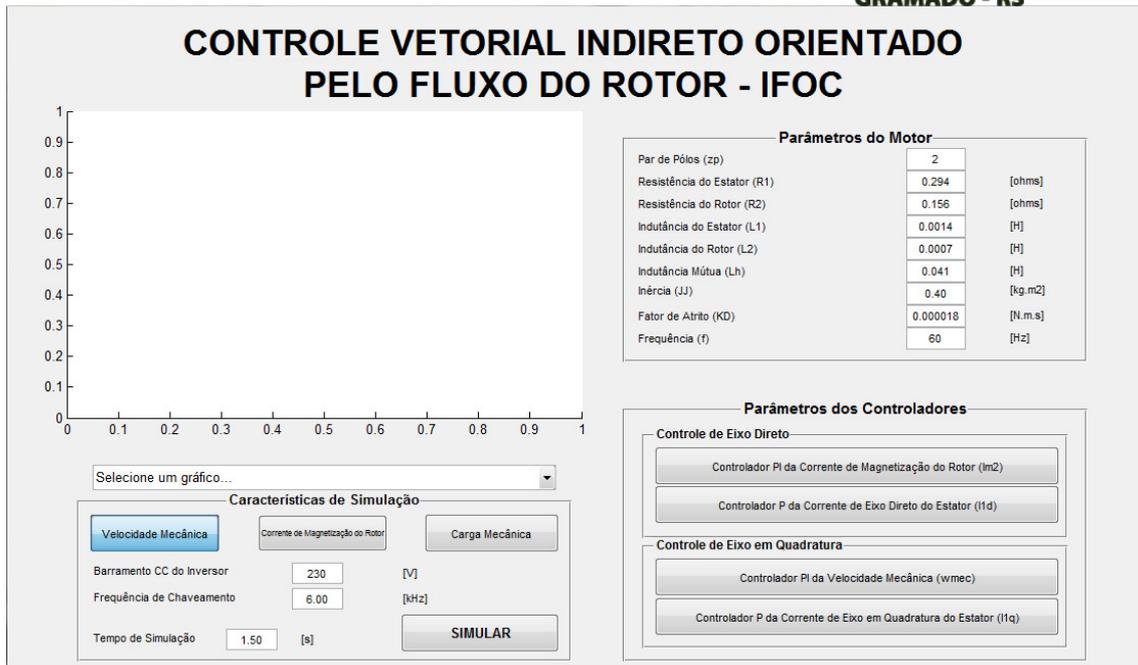


Figura 2. Plataforma virtual da técnica IFOC.

É possível verificar pela Figura 2 que a plataforma foi dividida basicamente em quatro seções. Em cada uma delas o usuário possui livre acesso, podendo modificar os parâmetros do motor e dos controladores, as características de simulação e, ainda, acessar os gráficos. As demais figuras mostram as características da interface criada, podendo-se verificar que a *interface* é intuitiva e facilmente manuseável.

O painel “*Parâmetros do Motor*” é mostrado pela Figura 3. Tal painel permite ao usuário alterar os parâmetros do motor a ser simulado.

Parâmetros do Motor

Par de Pólos (zp)	2	
Resistência do Estator (R1)	0.294	[ohms]
Resistência do Rotor (R2)	0.156	[ohms]
Indutância do Estator (L1)	0.0014	[H]
Indutância do Rotor (L2)	0.0007	[H]
Indutância Mútua (Lh)	0.041	[H]
Inércia (JJ)	0.40	[kg.m ²]
Fator de Atrito (KD)	0.000018	[N.m.s]
Frequência (f)	60	[Hz]

Figura 3. Parâmetros do motor.

O painel “*Parâmetros dos Controladores*” é mostrado na Figura 4. Este painel possui quatro botões que quando ativados abrem suas respectivas janelas. Dois destes botões são relacionados ao controle do estator em eixo direto, e os outros são relacionados ao controle do estator de eixo em quadratura.

Caso o usuário necessite de alterar os valores das constantes dos controladores, pode-se pressionar um dos botões mostrados na Figura 4. Uma nova janela é aberta com as opções de alteração, como o mostrado pela Figura 5, a qual representa a janela de definição dos parâmetros relativos ao PI da malha de velocidade. Ao acionar os outros botões, janelas semelhantes são abertas.

O painel “*Características da Simulação*” é mostrado na Figura 6. Similarmente aos outros painéis, o usuário possui permissão alterar os valores da tensão do barramento CC do inversor, a frequência de chaveamento do inversor no acionamento, o tempo de simulação, a magnitude da corrente de magnetização da máquina, a carga mecânica constante no eixo e a referência de velocidade. Cada um dos botões abre sua respectiva janela, sendo a janela de velocidade mostrada pela Figura 7. Nesta janela pode-se definir o valor inicial e final de velocidade, além do instante de tempo que a referência é alterada. As janelas de corrente de magnetização do rotor e a carga mecânica são semelhantes à janela da velocidade mecânica da máquina, possuindo a mesma configuração. Após a definição de todos os parâmetros do acionamento o usuário deve pressionar o botão *Simular* para iniciar a coleta dos resultados. Quando a simulação é finalizada, o usuário pode selecionar os gráficos desejados (correntes trifásicas, velocidade mecânica, corrente de magnetização e torque eletromagnético).

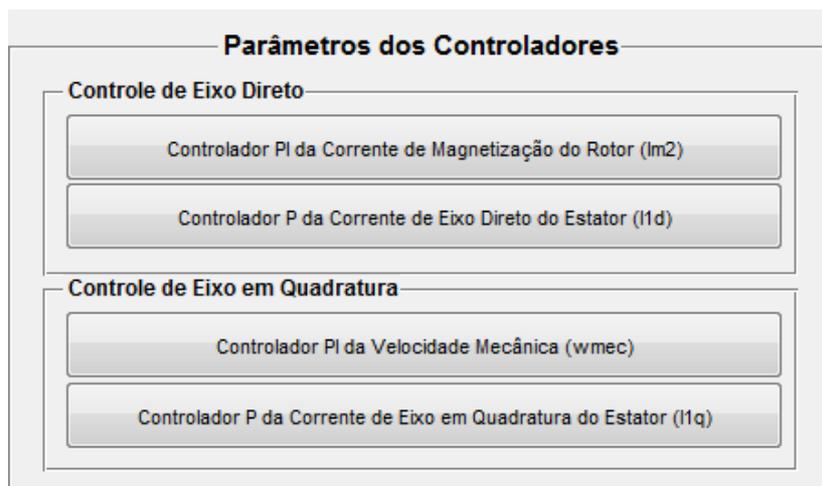


Figura 4. Parâmetros dos controladores.

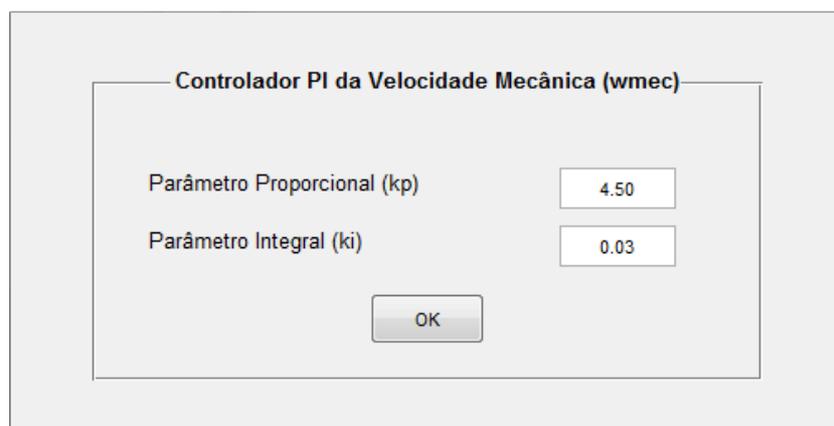
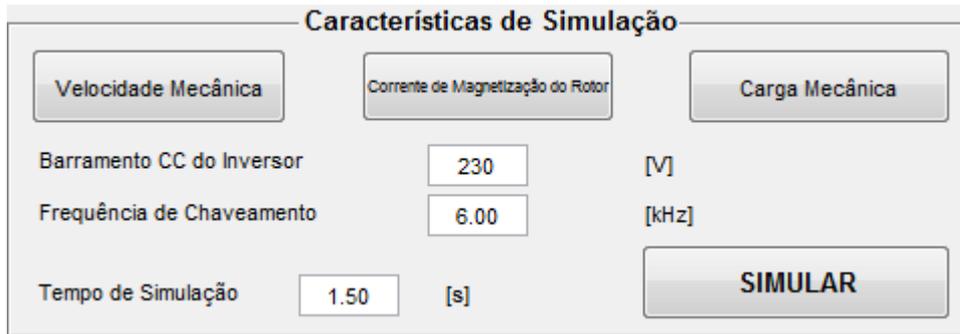


Figura 5. Controlador PI da velocidade mecânica.



Características de Simulação

Velocidade Mecânica Corrente de Magnetização do Rotor Carga Mecânica

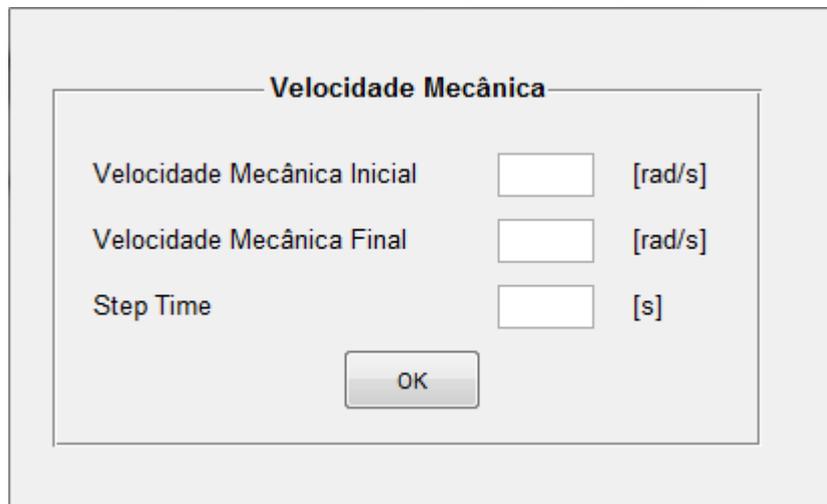
Barramento CC do Inversor 230 [V]

Frequência de Chaveamento 6.00 [kHz]

Tempo de Simulação 1.50 [s]

SIMULAR

Figura 6. Parâmetros de simulação.



Velocidade Mecânica

Velocidade Mecânica Inicial [rad/s]

Velocidade Mecânica Final [rad/s]

Step Time [s]

OK

Figura 7. Velocidade Mecânica.

4. RESULTADOS

Para verificar o comportamento do acionamento do motor utilizando a técnica proposta, uma simulação foi feita utilizando os parâmetros contidos nas Tabelas 1, 2 e 3.

Como previsto, a regulação de velocidade no acionamento FOC é muito precisa, podendo ser vista na Figura 8. Inicialmente a vazio, o motor atinge a velocidade de referência inicial em um curto intervalo de tempo. Posteriormente, no instante $t = 0,5s$, a referência de velocidade é alterada, inclusive com mudança de sentido de rotação, também estabilizando em um tempo pequeno. No instante de tempo $t = 1,1s$ uma carga é inserida no eixo do rotor fazendo com que a velocidade diminua por um curto intervalo de tempo, se reestabelecendo novamente no valor de referência em seguida, devido à atuação do PI de velocidade.

Ainda tendo em vista a Figura 8, pode-se observar a boa regulação do laço de controle da corrente de magnetização. Como mencionado anteriormente, para a realização da estratégia de controle proposta é necessário manter o fluxo do rotor constante. Isto só é possível se a corrente de magnetização permanecer constante. Tal corrente atinge seu valor de referência em um intervalo curto de tempo, sofrendo uma pequena variação quando o sentido de rotação do motor é alterado. Porém, a atuação do



PI desta malha de controle faz com que esta corrente de volte para seu valor de referência muito rapidamente, validando a premissa básica da estratégia FOC que é ter uma boa regulação desta grandeza.

A Figura 8 também exhibe o comportamento das correntes trifásicas. É possível observar um valor elevado de corrente na partida, decrescendo a um valor de operação com o passar do tempo. No instante $t = 0,5s$, em que há uma mudança no sentido de rotação da máquina, há um pico de corrente, uma vez que o torque solicitado é muito alto devido ao degrau de velocidade que a máquina é exposta. Ainda é possível observar que a frequência das correntes é baixa quando a máquina possui velocidade reduzida. Por fim, observa-se um incremento na magnitude da corrente após o instante $t = 1,1s$, quando uma carga mecânica é inserida no eixo da máquina.

O comportamento do torque eletromagnético também é mostrado pela Figura 8. Pode-se observar que sua amplitude é alta nas condições em que uma variação brusca de velocidade é requerida, ou seja, na partida e na inversão do sentido de rotação. Quando o motor atinge a velocidade de referência o torque passa a ser pequeno, apenas o suficiente para vencer as perdas rotacionais de funcionamento do motor. Porém, quando a carga é inserida ao seu eixo, o motor desenvolve um torque suficiente para suprir esta carga e as perdas rotacionais.

Os resultados obtidos com a simulação validam a plataforma virtual da técnica IFOC proposta. Além de a plataforma ser dinâmica e de fácil manuseio, os resultados podem ser observados com extrema facilidade e conclusões obtidas pelos alunos de uma forma bem prática. Além disso, os alunos podem modificar qualquer parâmetro da simulação, observando o comportamento da estratégia e a influência de cada parâmetro modificado no acionamento.

Tabela 1. Parâmetros do motor.

Parâmetros do motor	
Par de polos (z_p)	2
Resistência do estator (R_1)	0,294 Ω
Resistência do rotor (R_2)	0,156 Ω
Indutância do estator (L_1)	0,0014 H
Indutância do rotor (L_2)	0,0007 H
Indutância mutua (L_H)	0,041 H
Inércia (J)	0,40 kg.m ²
Fator de fricção (K_D)	0,000018 N.m.s
Frequência (f)	60 Hz



Tabela 2. Parâmetros dos controladores.

Parâmetros do Controlador	
<i>Controlador PI da corrente de Magnetização</i>	
KP	10,00
KI	0,25
<i>Controlador P da corrente de eixo direto do estator</i>	
KP	1,00
<i>Controlador PI da velocidade mecânica do motor</i>	
KP	4,50
KI	0,03
<i>Controlador P da corrente de eixo em quadratura do estator</i>	
KP	1,20

Tabela 3. Parâmetros de simulação.

Parâmetros de simulação	
<i>Velocidade Mecânica</i>	
Valor inicial	123,50 rad/s
Valor final	-38,10 rad/s
Tempo do degrau	0,50 s
<i>Corrente de magnetização</i>	18,00 A
<i>Carga Mecânica</i>	
Valor inicial	0,00 N.m
Valor final	70,45 N.m
Tempo do degrau	1,10 s
<i>Barramento CC do inversor</i>	230 V
<i>Frequência de chaveamento</i>	6,00 kHz
<i>Tempo de simulação</i>	1,50 s

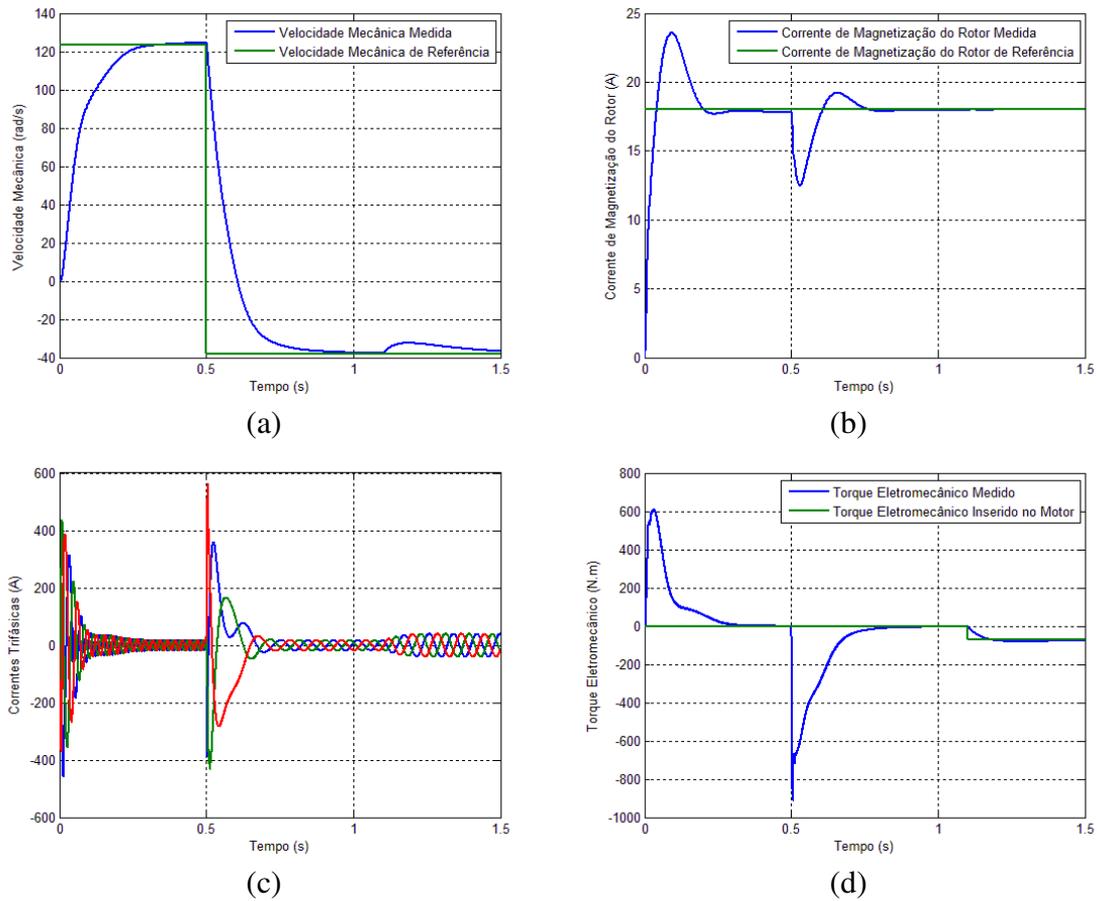


Figura 8. Resultados da simulação; (a) velocidade mecânica; (b) corrente de magnetização do rotor; (c) correntes trifásicas; (d) torque eletromagnético.

5. CONCLUSÕES

Um método de controle e acionamento de MITs foi apresentado. O método utiliza um modelo de controle indireto de campo orientado, e uma implementação computacional intuitiva do método é proposta. A teoria base do acionamento é o princípio de controle FOC.

O sistema foi validado por simulações baseadas em um modelo real da MIT, e os resultados apresentaram grande robustez e precisão do método de controle, mesmo com mudanças súbitas na carga ou na referência de velocidade.

A plataforma proposta apresenta os conceitos fundamentais da técnica FOC didaticamente. Assim, este trabalho pode ser utilizado como uma poderosa ferramenta no aprendizado de máquinas elétricas. Além disso, o presente trabalho pode ser usado para encorajar os alunos a pesquisarem sobre métodos de acionamento de máquinas, uma vez que o interesse nesta área pode ser despertado.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN, B. Induction Motors: Analysis and Torque Control. Springer, 2010.
- BLASCHKE, F. The principle of field orientation as applied to the trans vector closed-loop system rotating field machines. Siemens Rev., v. 34, p. 217-220, 1972.
- KRISHNAN, R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control. New York: Prentice Hall, 2001.
- KUMAR, N.; CHELLIAH, T. R.; SRIVASTAVA, S. P. Energy conservation study on induction motors using MATLAB/Simulink for enhancing electric machinery courses. Anais: IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering, p. H4B-10-H4B-16, 2012.
- ONG, C. M. Dynamic Simulations of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK. Prentice Hall, 1997.
- TRZYNADLOWSKI, A. M. The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors. Kluwer Academic Press, 1994.
- TRZYNADLOWSKI, A. M. Control of Induction Motors. Academic Press, 2000.
- VAS, P. Vector Control of AC Machines. Oxford University Press, 1994.

VIRTUAL PLATFORM OF FIELD ORIENTED CONTROL OF INDUCTION MOTOR TO ASSIST IN EDUCATION OF UNDERGRADUATE STUDENTS

***Abstract:** This paper proposes a virtual teaching platform applied to undergraduate students concerning an induction motor drive technique. Such a technique is called as Field Oriented Control (FOC) and it is presented and analyzed, in a simple form, by using the proposed platform. This virtual platform uses a GUIDE tool from MATLAB jointly with the SIMULINK. Simulation results of FOC strategy and also its simplicity usage are shown in this work.*

***Key-words:** Teaching, Education, Students, Induction motor, FOC.*