

Projeto de sistemas de controle vetorial do tipo IFOC para motores de indução

Vector control systems projects with IFOC for induction motors

RESUMO

Vinnicius Santos Mendes
vinnicius@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Emerson Giovanni Carati
emerson.carati@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

As máquinas elétricas possuem grande importância para o desenvolvimento tanto da indústria como do cotidiano humano. As mesmas estão presentes em usinas hidrelétricas, como geradores de energia elétrica, bem como em automações industriais, como motores, gerando tração mecânica. Ao longo da história sua versatilidade de uso demandou um controle da máquina cada vez mais efetivo, de alto desempenho, para que esta pudesse ser utilizada em aplicações mais complexas. O motor de indução se destaca por suas características específicas, porém seu modelo mais complexo por muito tempo limitou o projeto de sistemas de controle para os mesmos e seu uso se concentrou em aplicações mais simples. Neste trabalho, é investigada a técnica de controle por campo orientado indireto (IFOC). Utilizando técnicas de modelagem, para a descrição dos comportamentos do motor de indução trifásico, e um inversor de tensão, como atuador no acionamento, foi possível realizar um controle de alto desempenho do fluxo e torque do motor de maneira independente. Além disso, foi possível realizar o acionamento de motores reais a partir do projeto e implementação de uma plataforma de acionamento que inclui um inversor trifásico, projetada para ser utilizada em uma grande faixa de acionamentos.

PALAVRAS-CHAVE: IFOC. MIT. Acionamento. Controle de motores. Controle Vetorial.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



Electric machines are of great importance for the development of both industry and daily human life. They are present in hydroelectric plants, electric power generators, and industrial automation, such as engines, generating mechanical traction. Throughout history, its versatility of use has demanded an increasingly effective, high-performance machine control, so that it could be used in more complex applications. The induction motor stands out for its specific characteristics, but its more complex model for a long time limited the design of control systems for them, and its use was concentrated in simpler applications. In this work, the indirect oriented field control (IFOC) technique is investigated. Using modeling techniques, to describe the behavior of the three-phase induction motor, and a voltage inverter, as an actuator in the drive, it was possible to perform a high-performance control of the motor flow and torque independently. It was also possible to drive real motors from the design and implementation of a drive platform that includes a three-phase inverter, designed to be used in a wide range of drives.

KEYWORDS: IFOC. Induction Motor. Motors Drive. Vector Control.



INTRODUÇÃO

De todos motores elétricos que vieram a ser desenvolvidos o motor de indução trifásico (MIT) é o mais utilizado. Este se destaca principalmente devido a sua facilidade construtiva, custo baixo, robustez e alta capacidade de sobrecarga (CHAPMAN, 2013). A operação do MIT se dá através da indução de correntes no rotor, normalmente do tipo gaiola de esquilo, a partir de uma alimentação trifásica no estator. A interação entre os fluxos gerados pelas correntes do estator e as correntes induzidas no rotor gera o torque. Porém, mesmo possuindo um funcionamento simples, a modelagem da máquina para implementação de estratégias de controle possui uma alta complexidade, limitando, a princípio, a aplicação desse tipo de motor de forma mais vasta (BOSE, 2002). Suas aplicações de alto desempenho foram propulsionadas pelos avanços da eletrônica de potência e microeletrônica e pelo desenvolvimento dos inversores de tensão (IT) com modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*). Das principais estratégias de controle que utilizam o IT como atuador no acionamento do motor de indução temos inicialmente o controle escalar e, posteriormente, o controle vetorial, proposto por Blaschke da década de 70, no qual reside a estratégia de controle foco deste trabalho: Controle por Campo Orientado Indireto (IFOC). Para utilizar estratégias de controle vetorial é necessária uma abordagem mais avançada do MIT, utilizando transformações de coordenadas, conhecidas como transformadas de Clarke ($abc/\alpha\beta$) e Park ($\alpha\beta/dq$) (CHAPMAN, 2013). Esta abordagem de controle permite que, através do sistema de coordenadas dq , obtido através das transformadas citadas, e, controlando as correntes do eixo em quadratura “q” e eixo direto “d”, é possível controlar de maneira independente o torque e o fluxo do MIT, respectivamente (BIM, E. 2015). Este desacoplamento entre os controles de fluxo e torque foram idealizados a partir da operação do motor de corrente contínua, onde a corrente de armadura controla o torque e a corrente de campo controla o fluxo. Neste trabalho são discutidos o comportamento do motor de indução de trifásico bem como a estratégia de controle IFOC para sua implementação. Primeiramente são apresentadas a modelagem e simulação das dinâmicas do motor de indução e, na sequência, a simulação da estratégia de controle IFOC implementada. Ainda neste artigo é discutida a implementação de uma plataforma de acionamento e de códigos em DSP para o acionamento real do motor de indução. Essa implementação só foi possível através de parceria com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campus Pato Branco, da UTFPR.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a descrição em espaço de estados, mais simples e de forma precisa com o real comportamento do motor de indução, é necessário considerar as seguintes hipóteses (CHAPMAN, 2013): A desconsideração da saturação do fluxo magnético; enrolamentos rotóricos e estatóricos idênticos e espaçados espacialmente 120° mecânicos; e, inexistência de harmônicos na distribuição da força magnetomotriz no entreferro. A partir dessas hipóteses é possível abordar o comportamento do motor de forma mais simples. Uma vez que o motor atua convertendo energia elétrica em energia mecânica, é possível gerar modelos distintos que descrevem cada fenômeno, realimentando as variáveis entre os modelos. Logo, utilizando um sistema arbitrário dq tem-se as equações (1) e (4) para a descrição do motor de

forma completa. A partir das dinâmicas de fluxo da máquina (1)-(2), é possível o cálculo do torque eletromagnético da máquina (3) e, conseqüentemente, descrever mecanicamente o motor (4):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{dr} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{ds} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_b & 0 \\ 0 & \omega_b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\omega_b R_s (X_{ml} - 1)}{X_{ls}} & -\omega & \frac{\omega_b R_s X_{ml}}{X_{ls} X_{lr}} & 0 \\ \omega & \frac{\omega_b R_s (X_{ml} - 1)}{X_{ls}} & 0 & \frac{\omega_b R_s X_{ml}}{X_{ls} X_{lr}} \\ \frac{\omega_b R_r X_{ml}}{X_{ls} X_{lr}} & 0 & \frac{\omega_b R_r (X_{ml} - 1)}{X_{lr}} & -(\omega - \omega_r) \\ 0 & \frac{\omega_b R_r X_{ml}}{X_{ls} X_{lr}} & (\omega - \omega_r) & \frac{\omega_b R_r (X_{ml} - 1)}{X_{lr}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} (L_r L_s (\phi_{qs} \phi_{dr} - \phi_{ds} \phi_{qr}) + L_m^2 (\phi_{ds} \phi_{qr} - \phi_{qs} \phi_{dr})), \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \left(\frac{P}{2J}\right) (T_e - T_L), \quad (4)$$

em que os parâmetros do motor são dados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Motor de Indução Trifásico

Símbolo	Parâmetro	Símbolo	Parâmetro
ω_b	Frequência base da máquina	L_s	Indutância do estator
ω	Velocidade do eixo dq em ang. elétricos	L_m	Indutância Mútua
ω_r	Velocidade do rotor em ang. elétricos	T_L	Torque de Carga
L_r	Indutância do rotor	J	Momento de Inércia

Fonte: Próprio autor (2019).

A obtenção dos parâmetros do motor é realizada basicamente através de dois ensaios: Ensaio à Vazio (EV) e Ensaio com Rotor Bloqueado (ERB). Neste trabalho, utilizando um motor de 4cv e 8 polos, W22-Premium, fabricante WEG, foram obtidos os seguintes parâmetros na tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros identificados por ensaios EV e ERB.

Parâmetro	Valor	Unidade
Resistência do Estator (R_r)	0.6759	Ω
Resistência do Rotor (R_r)	0.2615	Ω
Indutância do Estator (L_s)	0.0415	H
Indutância do Rotor (L_r)	0.0415	H
Indutância Mútua (L_m)	0.0387	H
Momento de Inércia (J)	0.1677	$Kg \cdot m^2$
Coeficiente de atrito (K)	0.02	$Kg \cdot m^2/s$
Número de Polos (P)	8	Polos

Fonte: Próprio autor (2019)

Como citado nas seções anteriores a ideia geral que compõe o controle vetorial foi proposta por Blaschke na década de 70 (BLASCHKE,1972). Esta técnica leva o nome de controle vetorial devido a possibilidade de realizar o controle tanto da amplitude de uma grandeza desejada quanto de sua fase ou orientação, dando à ideia de vetor (UMANS, S.D. 2014). Apesar desta técnica de controle possuir uma resposta relativamente lenta, quando comparada com técnicas como DTC

(Controle Direto de Torque), por exemplo, por utilizar controladores proporcionais integrais (PI) as respostas são mais suaves e menos suscetíveis a instabilidades. Além disso, a resposta é geralmente menos ruidosa. Para a implementação desta técnica é necessária que a orientação do fluxo rotórico seja com o eixo d e síncrono com a alimentação, para que o fluxo principal da máquina recaia totalmente sobre o eixo direto, ocasionando diversas simplificações na modelagem do MIT (BIM, E. 2015). A partir da modelagem discutida anteriormente é possível o cálculo da posição do eixo de referência realizando a estimação do escorregamento e fluxo rotórico da máquina, conforme a equação

$$\theta_{ref} = \int (\omega_r + \frac{L_m i_{qs}}{\tau_r \phi_{dr est}}) dt, \quad (5)$$

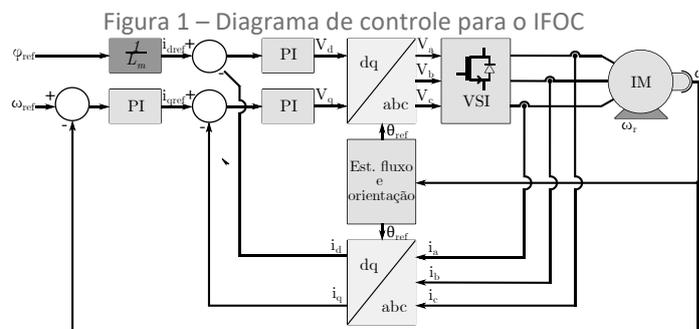
onde $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ é chamada de constante de tempo rotórica (BOSE, 2002).

Com a orientação correta do sistema dq , e a partir das simplificações que esse resulta, é possível, em regime permanente, obter (6) e (7), que mostram o desacoplamento e simplicidade do controle de torque e fluxo do motor (KRAUSE, 2002).

$$\phi_{dr} = L_m i_{ds} \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3}{4} \frac{P}{2} \frac{L_m \phi_{dr}}{L_r} i_{qs} \quad (7)$$

Nestas equações, com fluxo constante, é possível inferir que a corrente do eixo d controla o fluxo e a do eixo q controla o torque, sem interferência mútua (BLASCHKE, 1972). A estimação dinâmica do fluxo pode ser obtida utilizando o método de discretização *Backward* (OGATA, K. 1987). A partir dos pontos discutidos é proposto então o seguinte diagrama da figura 1 para a implementação da estratégia de controle.



Fonte: Próprio autor (2019).

Utilizando o projeto de controladores PI segundo (CÂMARA, 2007) e utilizando os parâmetros do motor utilizado em laboratório foram obtidos os ganhos mostrados na tabela 2 para os controladores de velocidade, fluxo e corrente.

Tabela 3 – Ganho dos controladores PI

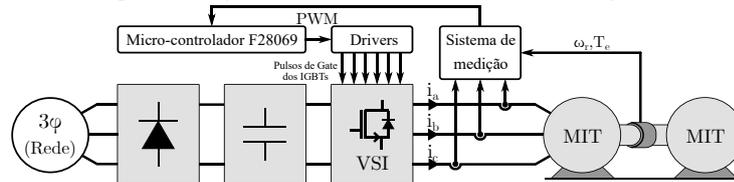
Controlador PI	Proporcional	Integral
Velocidade, fluxo	0.5949	2.9474
Corrente Id, Iq	13	662

Fonte: Próprio autor (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

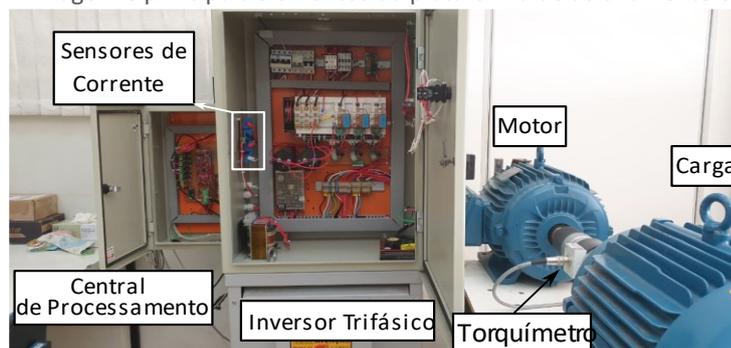
A implementação prática da estratégia de controle mostrada na figura 1 requer o uso de um inversor PWM. O inversor é geralmente alimentado por um barramento CC, que é criado a partir da retificação e filtragem da tensão trifásica fornecida pela rede elétrica, o que pode ser obtido utilizando diodos de potência, capacitores e indutores. Para gerar as tensões trifásicas controladas de acionamento do motor geralmente tem sido empregados microcontroladores ou DSPs. Neste trabalho a plataforma de acionamentos empregou o DSP TMS320F28069m, do fabricante *Texas Instruments*, para processamentos lógicos e cálculos da técnica de controle. Ainda, o DSP realiza as medições das variáveis de correntes, tensões e velocidade, e, a partir das ações de controle V_d e V_q , gera sinais modulados em largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) para comando dos IGBTs, acionando o motor. Para as medições elétricas (correntes e tensões), são utilizados basicamente sensores de efeito *Hall* e circuitos condicionadores de sinais que geram sinais de tensão filtrados e adequados aos níveis dos A/Ds do DSP. Para medição de velocidade e torque utilizou-se um *encoder* 12bits em código *gray* e um torquímetro HBM T22Wm, respectivamente. As principais etapas que compõem a plataforma de acionamento estão ilustradas no diagrama da figura 2. A imagem da plataforma no laboratório do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-Pato Branco) é apresentada na figura 3.

Figura 2 – Diagrama da plataforma de acionamento de máquinas elétricas



Fonte: Próprio autor (2019)

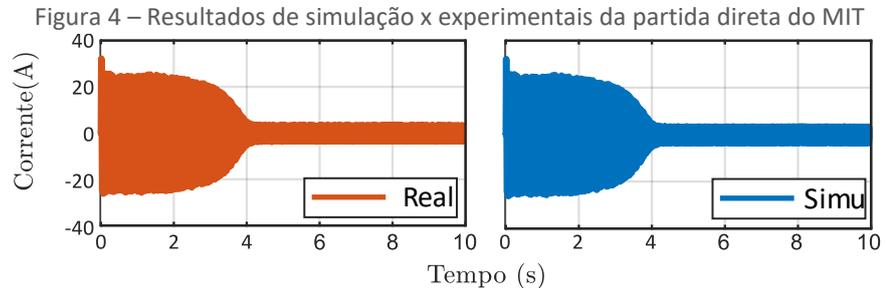
Figura 3 – Imagem e principais elementos da plataforma de acionamento construída



Fonte: Próprio autor (2019)

Primeiramente para validar o funcionamento da plataforma de acionamento em conjunto com resultados obtidos em simulação à malha aberta, foi realizado um acionamento de forma direta com a frequência nominal do motor, porém com tensão reduzida. Foram utilizados 50Vrms, que correspondem a cerca de 20% da tensão nominal do motor (220Vrms). Desta forma, foram obtidos resultados de corrente e velocidade para a partida direta do motor em tensão reduzida. A figura 4 ilustra o comportamento destas variáveis em resultados experimentais e de simulação. A comparação deixa clara a similaridade do comportamento do modelo utilizado em relação ao comportamento do motor real. É possível visualizar o

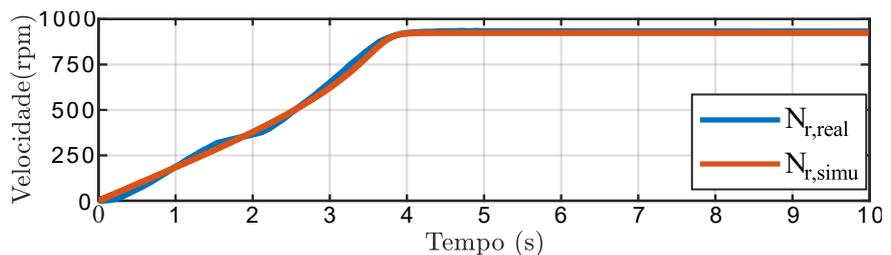
principal problema de acionar diretamente o motor, os elevados valores de corrente nos instantes iniciais da partida. Neste caso, esse transitório tem duração de aproximadamente 4 segundos.



Fonte: Próprio autor (2019)

Com relação a velocidade, na figura 5 é apresentada a comparação dos resultados experimental e de simulação, durante o referido acionamento. A velocidade real possui pequenas perturbações durante o transitório, porém essas podem ter sido causadas pelo acoplamento entre os motores (motor e carga) de forma imperfeita. Apesar disso, com relação ao regime permanente ambas encontram valores próximos de 880 RPM.

Figura 5 – Acionamento velocidade em malha aberta: experimental e simulado

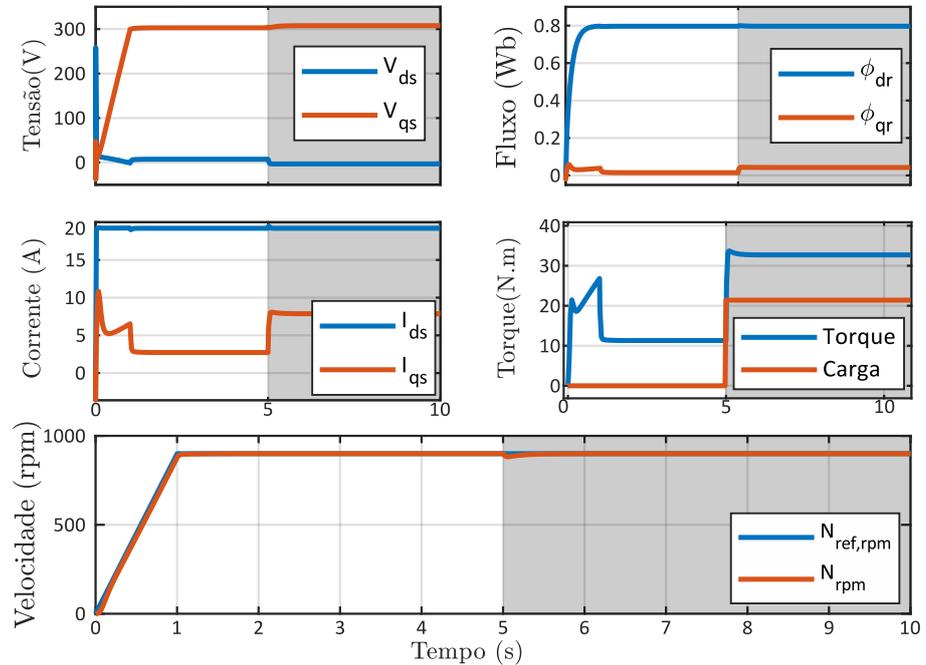


Fonte: Próprio autor (2019).

A partir da análise em malha aberta verificou-se que os parâmetros do motor são adequados para representar a plataforma e acionamento. Utilizando a topologia da figura 1, foi implementado um software de simulação da técnica IFOC com referência de velocidade de 900 RPM e com fluxo nominal da máquina. Os resultados de simulação obtidos são ilustrados na figura 6, onde a partida é realizada em rampa e uma carga é inserida em 5s. É possível, primeiramente, visualizar o alinhamento correto do sistema de coordenadas dq de forma que o fluxo rôtorico em quadratura é praticamente nulo durante o acionamento em rampa, e nulo em regime permanente. Assim, é possível verificar, através do valor de fluxo de eixo direto, que o fluxo de referência foi mantido corretamente. O valor de fluxo em regime permanente é de 0,7425 Wb. A partir disso, é possível se verificar a simplificação apresentada em (6), considerando que a corrente de eixo direto resultante em regime permanente é aproximadamente 19,2 A. No caso da corrente de eixo em quadratura, quando comparada com o torque do motor, é possível visualizar exatamente o mesmo comportamento, indicando proporcionalidade entre os mesmos e confirmando a semelhança entre a corrente de eixo em quadratura e a corrente de armadura de um motor CC. Desta ideia, pode-se estender que a corrente de eixo direto é equivalente a corrente de campo do motor CC. Vale ressaltar que como o eixo dq está girando sincronicamente com a frequência da rede, as variáveis da malha de controle nos eixos dq terão valores

contínuos, enquanto as tensões e correntes trifásicas que efetivamente acionam o motor variam senoidalmente.

Figura 3 – Simulação da estratégia de controle IFOC.



Fonte: Próprio autor (2019)

CONCLUSÃO

Analisando as dinâmicas do MIT e através de transformação de coordenadas é possível descrever o comportamento do mesmo com um modelo matemático simples e apropriado para simulações computacionais. Com a orientação correta do sistema dq e ganhos projetados adequadamente foram obtidos resultados satisfatórios que permitem que a teoria vista em livros seja verificada em simulações computacionais e experimentalmente. A verificação do comportamento experimental foi realizada utilizando a plataforma de acionamento construída ao longo da iniciação científica em parceria com o PPGE. Além disso, com técnicas de controle mais avançadas foi possível reduzir os transitórios de corrente que atingiram cerca 8 vezes a corrente de regime permanente do motor. No caso da estratégia IFOC, as respostas foram de forma suave com tempo de resposta satisfatórios. Ainda, foi desenvolvida uma plataforma totalmente funcional para a implementação de estratégias de acionamento de motores também como os programas essenciais para leitura de variáveis analógicas e acionamento do inversor PWM. Desta forma, os resultados obtidos durante a iniciação poderão ser utilizados em futuros trabalhos de acionamento de máquinas elétricas do grupo de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

À UTFPR, pela infraestrutura, ao PPGE por tornar possível a utilização dos laboratórios de pesquisa, e aos órgãos de fomento Fundação Araucária, CAPES, FINEP, CNPq, pelos recursos necessários para a plataforma de acionamento.

REFERÊNCIAS

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento** - 4ed. Elsevier Brasil, 2015. ISBN 9788535277142. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/edson-bim/maquinas-eletricas-e-acionamento/2270285996>. Acessado em: 12 jul. 2020.

BLASCHKE, F. **The Principle of Field Orientation Applied to the New Transvector Closed Loop Control System for Rot.** 1972. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Principle-of-Field-Orientation-Applied-to-the-Blaschke/a0c8a12cbf46d84f7d1a81f731f0681839747d05>. Acessado em: 12 jul. 2020.

CÂMARA, H.T. **Uma contribuição ao controle de motores de indução trifásicos sem o uso de sensores mecânicos.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul
Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3652/HELDERCAMARA.pdf>.
Acessado em: 12 jul. 2020.

CHAPMAN, S.J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas** - 5ed. AMGH Editor, 2013. ISBN 9788580552072. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/stephen-j-chapman/fundamentos-de-maquinas-eletricas/3258505387>. Acessado em: 10 jul. 2020.

OGATA, Katsuhiko. **Discrete-Time Control Systems** – 2ed. USA: Prentice-Hall, Inc., 1987. ISBN 0132161028. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Discrete_time_Control_Systems.html?id=owQqAQAAAJ&redir_esc=y. Acessado em: 12 jul. 2020.

UMANS, S.D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley** - 7ed. AMGH Editor, 2014. ISBN 9788580553741. Disponível em: https://www.academia.edu/35761032/Maquinas_eletricas_de_Fitzgerald_7ed_Stephen_D_Umans_pdf. Acessado em: 9 jul. 2020.

BOSE, B.K. **Modern Power Electronics and AC Drives** - 2ed. Prentice Hall PTR, 2002. (Eastern Economy Edition). ISBN 9780130167439. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Modern_Power_Electronics_and_AC_Drives.html?id=QWnHQgAACAAJ&redir_esc=y. Acessado em: 10 jul. 2020.