Identificação de Sistema e Controle de Velocidade de um Motor de Indução usando Processador Digital TMS320F28379D

Eduardo V. B. R. Simões *, **Laurinda L. N. dos Reis** *, **Alanio F. Lima** *, **Klysmann G. F. Barbosa** *, **René P. Torrico Bascopé** *, **Antônio B. S. Júnior** **

* *UFC - Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, CE, (e-mail: eduardovilasboas@alu.ufc.br, laurinda@dee.ufc.br, allanio007@gmail.com, klysmann.eng@gmail.com, rene@dee.ufc.br).*
** *IFCE - Instituto Federal do Ceará - Fortaleza, CE, (e-mail: barbosa@dee.ufc.br).*

Abstract: To control the speed of a Three-Phase Induction Machine (MIT) applied to a robotic manipulator, it is necessary to control the current first, which is done using a more sophisticated control technique, such as the Indirect Field Oriented Control (IFOC) method. This paper presents the application of IFOC using Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) to achieve speed control based on the Proportional-Integral (PI) controller. For the experimental test, where input and output samples of the system were collected, the Non-Recursive Least Squares method (MQNR) was applied to obtain the representation of the system model and, consequently, the controller parameters. The method was implemented using the Texas Instruments® TMS320F28379D digital signal processor (DSP), and the experimental results obtained confirm the efficacy of the system.

Resumo: No controle de velocidade de uma Máquina de Indução Trifásica (MIT) aplicada a um manipulador robótico tem-se que, primeiro, controlar sua corrente, o que é feito por meio de alguma técnica de controle mais rebuscada, tal como o método de Controle de Campo Orientado Indireto (IFOC). Este trabalho apresenta a aplicação de IFOC utilizando Modulação por Largura de Pulso de Espaço Vetorial (SVPWM) para a obtenção do controle de velocidade baseado no controlador Proporcional-Integral (PI). A partir de um ensaio experimental, onde foram coletadas amostras da entrada e saída do sistema, foi aplicado o método de Mínimos Quadrados não Recursivos (MQNR) para se obter a representação do modelo do sistema e, consequentemente, os parâmetros do controlador. O método foi implementado utilizando-se o processador digital de sinais (DSP) da *Texas Instruments*® TMS320F28379D e os resultados experimentais obtidos comprovam a eficácia do sistema.

Keywords: SVPWM; FOC; induction motor; robotic manipulator; systems identification; least squares, DSP, PI control.

Palavras-chaves: SVPWM; FOC; motor de indução; manipulador robótico; identificação de sistemas; mínimos quadrados, DSP, controle PI.

1. INTRODUÇÃO

A área da robótica está em constante desenvolvimento devido à necessidade de aumentar a quantidade e qualidade de produtos industrializados. Tal necessidade faz com que sejam necessárias melhorias no setor industrial. Assim, novas técnicas são desenvolvidas com o objetivo de aprimorar os sistemas robóticos.

Essas técnicas estão relacionadas tanto à otimização de modelos utilizando métodos de identificação (Souza et al., 2021), quanto à utilização de componentes mais econômicos, como os motores de indução trifásicos (MIT) (Sudaryanto et al., 2021).

Vários algoritmos de identificação de sistemas foram propostos na literatura. Por meio de métodos tradicionais e híbridos, Guimaraes Batista et al. (2023) apresenta o modelo de controle e identificação da junta de um manipulador cilíndrico acionada por um MIT baseado em mínimos quadrados não recursivos (MQNR), mínimos quadrados recursivos (MQR) e otimização de enxame de partículas (PSO) com espaço de busca definido por MQR (MQR-PSO). Utilizando-se de dados experimentais, Guimaraes Batista et al. (2023) encontra as funções de transferência dos modelos e mostra que o MQR-PSO apresentou melhores resultados em comparação aos outros dois algoritmos (MQ e MQR).

Já Souza et al. (2021) apresenta a identificação da junta de um manipulador robótico acionada por um MIT baseado em MQR, mínimos quadrados recursivos estendidos (MQRE) e MQR com matriz de regressores e vetor de

parâmetros otimizados via método do filtro de Kalman (MQR-KF). Utilizando-se da mesma metodologia de Guimaraes Batista et al. (2023), Souza et al. (2021) mostra que o MQR-KF apresentou melhores resultados em comparação aos demais algoritmos.

Kuo (2018) identifica um MIT pelos modelos Auto Regressivo com entrada eXógena (ARX) e de Média Móvel Auto Regressiva com entrada eXógena (ARMAX). Por meio do modelo identificado, a saída prevista pode ser comparada com a saída medida para ajudar a evitar que as falhas do motor se desenvolvam em uma falha catastrófica, o que pode ser muito benéfico para aplicações mais robustas (Kuo, 2018).

Em se tratando de novas propostas, de Almeida Rego et al. (2014) apresenta uma aplicação de inteligência artificial usando redes de função de base radial (RBF), visando identificar diferentes sistemas não lineares e analisar os resultados obtidos. Assim, uma rede RBF é treinada e simulada para obter uma relação entre a dinâmica dos sistemas e a resposta RBF, demonstrando a eficácia desta abordagem (de Almeida Rego et al., 2014).

Em (Chen et al., 2018), é feita identificação do sistema usando algoritmo genético real-codificado (RGA) com um observador robusto de ordem reduzida (RRO) para um motor de indução (MI). Como as ligações de fluxo do rotor de um MI não são facilmente mensuráveis, o RRO é proposto para observá-las. Já o RGA otimiza, com sucesso, funções de aptidão para encontrar os parâmetros desconhecidos do sistema, como visto nos resultados (Chen et al., 2018).

Dito isto, é visto que os métodos de identificação podem ajudar bastante na otimização das plantas. Além de que, nestes trabalhos, a identificação é realizada em sistemas com motores de indução, sendo alguns trifásicos. Estes motores são alvos constantes de pesquisas envolvendo melhorias industriais, pois possuem construção compacta, fácil manutenção e baixo custo, como dito por Sudaryanto et al. (2021), apesar da relativa complexidade para elaborar o seu controle.

Os acionamentos de média tensão são geralmente baseados em inversor de fonte de tensão (VSI) ou inversor de fonte de corrente (CSI). Os acionamentos de MI alimentados por CSI trifásico se tornam um forte candidato em aplicações de média tensão (Guo et al., 2017).

Guo et al. (2017) dita que o controle direto orientado a campo (DFOC) de MIs alimentadas por CSI obtiveram desempenho aprimorado, mas enfrenta desafios práticos, como resposta dinâmica ruim e dependência de parâmetros da máquina.

Assim, Guo et al. (2017) descreve um método de controle indireto orientado a campo (IFOC) alimentado por CSI de alto desempenho, onde um observador de fluxo do rotor e dois controladores proporcionais-integrais (PI) são usados para obter boa resposta dinâmica do sistema e orientação do fluxo do rotor, tendo resultados com bom desempenho dinâmico e estabilidade.

Grouni et al. (2010) reitera que o método de FOC é a maneira mais adequada de se obter um controle de alto desempenho para MI. Estimar a magnitude e a fase do fluxo do rotor é muito crucial para a implementação do método, mas sua precisão dependerá principalmente do conhecimento preciso da constante de tempo (Grouni et al., 2010).

Assim, Grouni et al. (2010) diz que a otimização do fluxo do rotor é um parâmetro crucial na implementação do FOC. Com isso, o pesquisador aborda o problema de encontrar a referência de fluxo ideal que minimiza o consumo de energia, sujeito a restrições de tensão e corrente. A solução proposta é validada experimentalmente, demonstrando sua eficácia em termos de desempenho e consistência (Grouni et al., 2010).

Já Tabasian et al. (2021) foca nos acionamentos de MIT conectado em estrela (SCTPIM) contra falha de circuito aberto monofásico. O mesmo propõe estratégia IFOC de campo médio que pode ser compartilhada durante operações de falha normal e de fase aberta, por meio do uso de matrizes de transformação nas equações assimétricas SCTPIM defeituosas, transformado-as em equações simétricas. Essa prática traz melhoras no desempenho do motor, com redução de ondulações de velocidade e torque, e eliminação de desequilíbrios nas correntes SCTPIM defeituosas (Tabasian et al., 2021).

Nesse sentido, por meio de IFOC e de sua boa capacidade de estabilizar um sistema, admite-se transformar uma planta trifásica variante no tempo em um sistema bifásico invariante no tempo. Isso é feito por meio das transformadas de *Clarke* e *Park*, tornando-se possível analisar as variáveis e elaborar um controle eficaz (Li et al., 2018). Ademais, um dos métodos de Modulação por Largura de Pulso (PWM) mais utilizados nesse tipo de aplicação é o de Espaço Vetorial (SVPWM), cuja função é controlar a tensão de saída do inversor trifásico (Gupta et al., 2023).

Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo aplicar IFOC em um MIT usado em um manipulador robótico a fim de controlar sua velocidade. Para tanto, utilizou-se a identificação baseada em MQNR para se obter o modelo do sistema a fim de ajustar os parâmetros do controlador PI. Além disso, foi feita a análise do comportamento do sistema e a influência causada no controle PI sem a carga, ou seja, sem o manipulador acoplado.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 Características da planta

O manipulador utilizado é do tipo cilíndrico de 3 GDL com configuração Rotacional-Prismático-Prismático (RPP), conforme apresentado na Figura 1. Cada junta do manipulador é acionada por motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo (Souza et al., 2021). Estes motores são do modelo W21 da *WEG*® e possuem 0.5cv, tensão nominal de 380V em estrela e 220V em delta, 4 pólos e corrente nominal de 1.18A (Rebouças, 2017).

Neste sistema utilizou-se um processador que possui hardware e software mais robusto com maior capacidade de aquisição de dados e acionamento dos motores, isto é, o processador digital de sinais (DSP) da *Texas Instruments*® TMS320F28379D, com programação implementada na linguagem C no software *Code Composer Studio*.

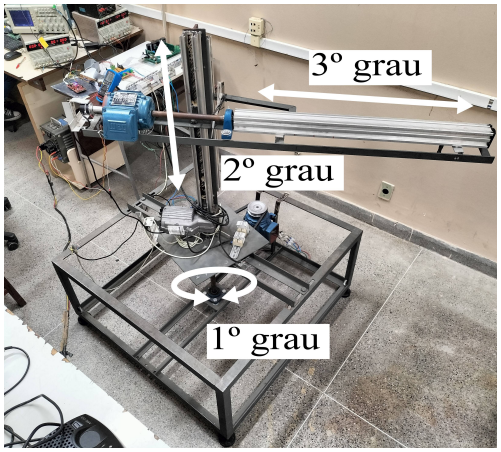

Figura 1. Manipulador cilíndrico.

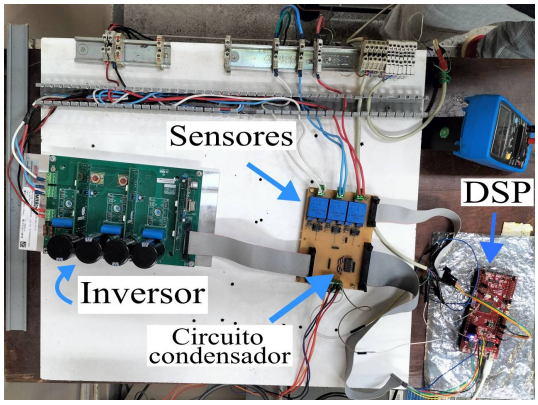

Figura 2. Bancada com instrumentos utilizados no projeto.

Dentre os principais componentes utilizados tem-se o inversor trifásico da *Semikron*® de modelo SKS 18G B6I11 V12 que recebe o sinal PWM da DSP para acionamento dos motores, o *encoder* óptico rotativo incremental 600 P/R 5V-24V utilizado para a medição da posição do rotor do motor, os sensores de corrente de efeito *Hall* da marca *LEM*® que estão em uma placa condicionadora de sinais e fontes auxiliares para alimentação do inversor e dos outros componentes. Na Figura 2, observa-se a bancada com estes instrumentos.

Embora o manipulador robótico possua 3 graus de liberdade, o artigo se restringe à análise do primeiro GDL. Este é representado pelo motor de indução da base, sendo responsável pela rotação em torno do eixo vertical. Além disso, salienta-se que o projeto e os testes foram realizados com o motor a vazio.

2.2 Controle de Campo Orientado Indireto (IFOC)

Esse método é amplamente utilizado para controlar a velocidade ou a posição de motores, sendo bastante aplicado aos MITs ao simplificar o sistema para a elaboração da lei de controle. Na Figura 3 mostra-se um diagrama de blocos adaptado de Rebouças (2017) que traduz de maneira mais clara a lógica que fundamenta o IFOC e de que forma ele foi utilizado neste trabalho.

O inversor trifásico, que aciona o MIT, é alimentado por uma tensão contínua que provém da retificação de uma fonte de tensão alternada. O *encoder*, por sua vez, indica

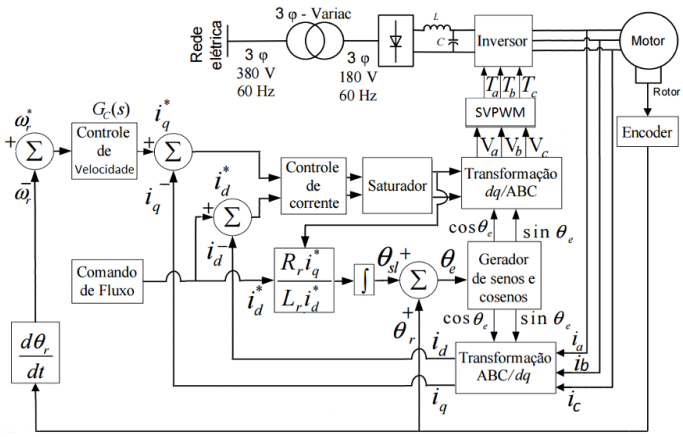

Figura 3. Diagrama de blocos do IFOC aplicado a um MIT.

a posição angular do rotor (θ_r), cuja derivada resulta na velocidade (ω_r). Desse modo, o erro de velocidade é calculado com relação à referência (ω_r^*) servindo de entrada para o bloco de controle *Gc(s)*. As correntes das fases A, B e C (i_a, i_b, i_c) do motor são medidas e modificadas para um sistema bifásico com uma corrente do eixo direto e uma corrente do eixo de quadratura (i_d e i_q). Para que isso ocorra, duas transformadas são aplicadas: a de *Clarke* e a de *Park*.

A transformada de *Clarke*, por meio de uma transformação linear, leva o modelo trifásico variante no tempo *ABC* para um modelo bifásico estacionário $\alpha\beta 0$. Em seguida, aplica-se a transformada de *Park*, a qual transforma o modelo $\alpha\beta 0$ em um modelo bifásico síncrono $dq0$.

Nas equações (1) e (2), observam-se as transformadas de *Clarke* e *Park* na forma matricial (Nishad and Sharma, 2018):

$$i_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$i_{dq0} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} cos(\theta) & cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ sen(\theta) & sen(\theta - \frac{2\pi}{3}) & sen(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

sendo $i_{\alpha\beta 0}$ a corrente do modelo $\alpha\beta 0$, i_{dq0} a corrente do modelo $dq0$ e θ o ângulo do campo girante do motor, cuja obtenção ocorre entre a soma de θ_r e do ângulo de escorregamento θ_{sl}, o qual pode ser calculado pela equação (3),

$$\theta = \int \frac{R_r i_q}{L_r i_d} d\theta, \tag{3}$$

onde R_r é a resistência do rotor, L_r é a indutância do rotor e i_q^* e i_d^* são as corrente de referência do eixo de quadratura e do eixo direto. Entretanto, como a determinação de

parâmetros físicos do rotor não é tão trivial, o θ_{sl} é estimado pelo software.

Assim sendo, através das duas transformadas, pode-se observar em (4) e (5) equações polinomiais conforme Umans (2014):

$$i_d = \frac{2}{3} \cdot [i_A cos(\theta) + i_B cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_C cos(\theta + \frac{2\pi}{3})], \quad (4)$$

$$i_q = \frac{-2}{3} \cdot [i_A sen(\theta) + i_B sen(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_C sen(\theta + \frac{2\pi}{3})], \quad (5)$$

onde i_d é a corrente do eixo direto, i_q é a corrente do eixo de quadratura e i_A, i_B e i_C são as correntes das fases A, B e C, respectivamente.

Com os valores de i_d e i_q, os erros das correntes são calculados com i_d^* fixo e i_q^* sendo obtido pela saída do bloco de controle *Gc(s)*. Desse modo, ambos os erros servem como entrada para o controle de corrente, cujas saídas são as tensões V_d e V_q (do eixo direto e de quadratura), as quais passam por um simples saturador. Tal valor, quando obtido, é aplicado nas transformadas inversas de *Park* e *Clarke*, respectivamente, para a obtenção do sistema trifásico ABC novamente com a estimação das tensões de cada fase (V_A, V_B e V_C).

Por fim, o período de chaveamento de cada uma das chaves (T_A, T_B e T_C) é determinado pela aplicação das tensões encontradas na técnica de SVPWM, fazendo com que a comutação das chaves do inversor gere uma tensão trifásica equivalente acionando o motor de forma que ele gire com a velocidade mais próxima possível de ω_r^*.

2.3 Modulação por Largura de Pulso de Espaço Vetorial (SVPWM)

A técnica de SVPWM pode ser resumida em um mapeamento vetorial dos estados de chaveamento de um inversor nos eixos $dq0$, sendo utilizada para modular a tensão de saída do mesmo (Boulmane et al., 2018). O inversor utilizado possui chaves S_1 a S_6, sendo que as chaves ímpares são complementares das chaves pares, ou seja, caso $S_3 = 1$, logo $S_4 = 0$ e vice-versa.

Nesse sentido, a Tabela 1 mostra os setores de chaveamento, sendo V_0 a V_7 os vetores dos estados de cada chave a cada setor. Por meio desses setores e de uma tensão de referência V_{ref}, isto é, o vetor da tensão que o sistema está assumindo, encontram-se os tempos de chaveamento T_1, T_2 e T_0, sendo T_0 o período remanescente nos estados V_0 e V_7 (Kumar et al., 2010).

Tabela 1. Estados das chaves S_1, S_3 e S_5 em cada vetor.

Vetores	S_1	S_3	S_5
V_0	0	0	0
V_1	1	0	0
V_2	1	1	0
V_3	0	1	0
V_4	0	1	1
V_5	0	0	1
V_6	1	0	1
V_7	1	1	1

A partir dessas informações pode-se obter o setor no qual V_{ref} se encontra e calcular os tempos de chaveamento baseados nesse sinal de tensão. Com isso, a modulação por Espaço Vetorial consegue ser utilizada de maneira eficaz (Kumar et al., 2010).

2.4 Mínimos Quadrados Não Recursivos (MQNR)

O MQNR foi usado neste artigo por ser um dos métodos mais simples e conhecidos na área de identificação de sistemas, bem como fácil de ser implementado. Segundo Coelho and dos Santos Coelho (2004), o sistema a ser identificado é caracterizado por uma entrada $u(t)$, uma saída $y(t)$, uma perturbação $e(t)$, sendo a variável de tempo discreto $t \in \mathbb{N}$. A função de transferência discreta linear é dada por:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) + e(t), \quad (6)$$

em que:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + ... + a_{na} z^{-na}, \quad (7)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + ... + b_{nb} z^{-nb}, \quad (8)$$

onde tem-se (na + nb + 1) parâmetros a estimar, sendo a_i e b_j as medidas de entrada e saída do processo.

A formulação do MQNR pode ser reescrita como modelo de regressão linear (Coelho and dos Santos Coelho, 2004), dada por:

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + e(t), \quad (9)$$

onde $\varphi(t)$ é definido como o vetor de medidas,

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) - ... - y(t-na) + u(t-d) \; ... \; u(t-d-nb)], \quad (10)$$

e $\theta(t)$ é definido como o vetor de parâmetros,

$$\theta^T(t) = [a_1 \; ... \; a_{na} \; b_0 \; ... \; b_{nb}]. \quad (11)$$

Realizando N medidas, suficientes para determinar os parâmetros a_i e b_j, tem-se na equação (12) a representação matricial da equação (9),

$$\hat{\theta} = [\phi^T \phi]^{-1} \phi^T Y. \quad (12)$$

3. RESULTADOS

3.1 Identificação do Sistema

Com o funcionamento da malha de corrente, aplicou-se vários degraus de corrente ao sistema, de 0 a 1 A, para se observar a característica da velocidade em rotações por minuto (RPM) em malha aberta, obtendo-se os dados da Figura 4. Assim, foram coletados 4000 amostras com um tempo de amostragem de 0,003 s, ou seja, ao todo, levou-se 12 s para terminar coleta dos dados.

Estes dados da figura 4 foram utilizados para a identificação do modelo do sistema utilizando-se o MQNR, o qual gerou a função de transferência no domínio discreto relacionando a velocidade e corrente, representada pela equação (13),

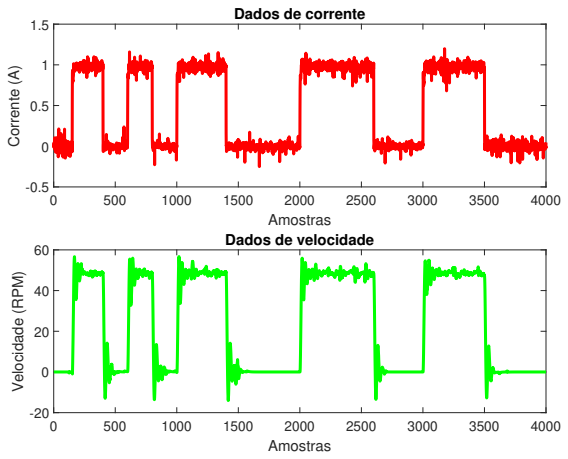

Figura 4. Característica da velocidade em RPM sob resposta ao degrau da corrente i_q em malha aberta.

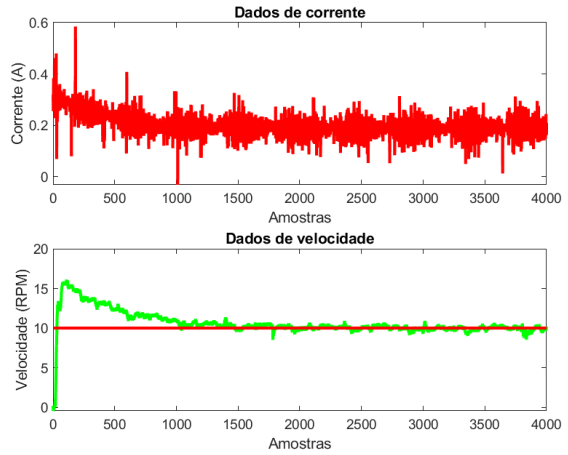

Figura 5. Comportamento da corrente i_q e da velocidade em malha fechada com controlador PI.

$$G(z) = \frac{0.9974z^{-1} + 1.289z^{-2}}{1 - 1.7z^{-1} + 0.746z^{-2}}, \tag{13}$$

A partir da equação (13), projetou-se um controlador PI na configuração em paralelo no *Matlab/Simulink* de modo a se obter os critérios de desempenho especificados da seguinte maneira: tempo de subida, tempo de estabilização e sobressinal, aproximadamente como 2,5s, 2,8s e 0s, respectivamente. Com estes valores obteve-se o ganho proporcional (K_P) e o tempo integrativo (T_I) equivalentes a 0,001 e 0,0221, respectivamente.

3.2 Malha de Velocidade

Desse modo, fechando a malha de velocidade, utilizando os parâmetros do controlador encontrados na seção 3.1 e colocando-se a referência de velocidade de 10 RPM, que está representada nos gráficos por intermédio de uma linha vermelha, obteve-se a resposta conforme mostrada na Figura 5.

Finalmente, na Figura 6 observa-se o experimento realizado na planta em malha fechada, no qual aplicou-se uma perturbação externa ao sistema com o intuito de analisar o

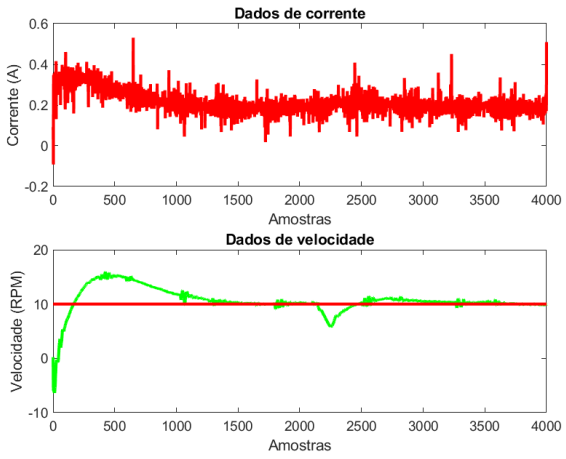

Figura 6. Comportamento da corrente i_q e da velocidade em malha fechada com controlador PI sob perturbação.

seguimento para a velocidade de referência. Desta forma, observa-se que o controlador PI foi eficaz na rejeição das perturbações. Tal distúrbio foi executado por intermédio de um rápido impedimento na rotação do eixo do motor.

4. CONCLUSÃO

Como pode ser observado a partir dos resultados obtidos com a nova DSP $TMS320F28379D$, o sistema obteve eficácia no controlador obtido considerando a metodologia empregada na modelagem da planta, o que pode ser visto na estabilização em torno do valor de referência com uma precisão adequada. Além disso, o sistema também rejeitou perturbações verificando-se as nuances do comportamento do motor sem o manipulador acoplado. Portanto, este trabalho conclui-se de forma satisfatória, preparando o cenário para os próximos passos dessa pesquisa, isto é, acoplar o manipulador e realizar a identificação para o controle de velocidade e de posição para essa junta. Posteriormente, deve-se realizar o mesmo procedimento para os outros dois motores de modo que os três graus de liberdade do sistema estejam totalmente controlados e capazes de se posicionar em qualquer região do espaço que for especificada por meio de coordenadas cilíndricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS

Boulmane, A., Zidani, Y., and Belkhayat, D. (2018). Implementation of modulation techiniques on tms320f28379d launchpad using the boostxl-drv8305evm. *IEEE*.

Chen, K.Y., Yang, W.H., and Fung, R.F. (2018). System identification by using rga with a reduced-order robust observer for an induction motor. *Mechatronics*, 54, 1–15. doi:https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.07.001. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415818301090`.

Coelho, A. and dos Santos Coelho, L. (2004). *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Editora da UFSC.

de Almeida Rego, J.B., de Medeiros Martins, A., and Costa, E.d.B. (2014). Deterministic system identification using rbf networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014(1), 432593. doi:https://doi.org/10.1155/2014/432593. URL `https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2014/432593`.

Grouni, S., Ibtiouen, R., Kidouche, M., and Touhami, O. (2010). Application of indirect field oriented control with optimum flux for induction machines drives. In K. Elleithy (ed.), *Advanced Techniques in Computing Sciences and Software Engineering*, 7–12. Springer Netherlands, Dordrecht.

Guimaraes Batista, J., Souza, D., Laurinda, L., Barbosa, A., and Rios, C. (2023). Identification of a robotic manipulator using rls-pso and control lqi with metaheuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1, 1. doi:10.1007/s00170-023-12187-2.

Guo, Z., Zhang, J., Sun, Z., and Zheng, C. (2017). Indirect field oriented control of three-phase induction motor based on current-source inverter. *Procedia Engineering*, 174, 588–594. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.192. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817301923`. 13th Global Congress on Manufacturing and Management Zhengzhou, China 28-30 November, 2016.

Gupta, S., George, D.S., and Awate, V. (2023). Pi controller design and application for svpwm switching techinique based foc of pmsm. *TEECCON*.

Kumar, K.V., Michael, P.A., John, J.P., and Kumar, D.S.S. (2010). Simulation and comparison of spwm and svpwm control for three phase inverter. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*.

Kuo, C.H. (2018). Two models for identification and predicting behaviour of an induction motor system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 297(1), 012040. doi:10.1088/1757-899X/297/1/012040. URL `https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/297/1/012040`.

Li, Y., Zhang, P., Hang, J., Ding, S., Liu, L., and Wang, Q. (2018). Comparison of dynamic characteristics of field oriented control and model predictive control for permanent magnet synchronous motor. *ICIEA*.

Nishad, B.K. and Sharma, R. (2018). Induction motor control using modified indirect field oriented control. *IEEE*.

Rebouças, L.R. (2017). *Controle de um Motor de Indução Trifásico como Servoposicionador Aplicado a um Manipulador Robótico Utilizando Controle de Campo Orientado*. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará.

Souza, D.A., Batista, J.G., Vasconcelos, F.J.S., Reis, L.L.D., Machado, G.F., Costa, J.R., Junior, J.N.N., Silva, J.L., Rios, C.S., and Júnior, A.B. (2021). Identification by recursive least squares with kalman filter (rls-kf) applied to a robotic manipulator. *IEEE ACCESS*.

Sudaryanto, A., Purwanto, E., Ferdiansyah, I., Nugraha, S.D., Qudsi, O.A., Rifadil, M.M., and Rusli, M.R. (2021). Design and implementation of svpwm inverter to reduce total harmonic distortion (thd) on three phase induction motor speed regulation using constant v/f. *ISRITI*.

Tabasian, R., Ghanbari, M., Esmaeli, A., and Jannati, M. (2021). Indirect field-oriented control of star-connected three-phase induction machine drives against single-phase open-circuit fault. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(6), e12873. doi:https://doi.org/10.1002/2050-7038.12873. URL `https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2050-7038.12873`.

Umans, S.D. (2014). *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. The McGraw-Hill Companies.