

# Controle Preditivo Baseado em Modelo com Estimação Paramétrica para SynRM

Paulo H. A. S. e Silva, Gustavo X. Prestes, Emmanuel A. Moura, Mozer S. Lorenzo, Dimas A. Schuetz, H. Pinheiro e Rodrigo Padilha Vieira  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM  
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC  
email: paulo.ifg21@gmail.com

**Resumo**—Motores Síncronos de Relutância são eficientes e econômicos devido à sua estrutura simples e à ausência de ímãs. Este artigo explora o acionamento do motor com estimativa de parâmetros. O controle de corrente é realizado por meio de controle preditivo baseado em modelo e pela estimativa dos parâmetros elétricos e mecânicos do motor utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Recursivos. Essa abordagem permite a obtenção dos parâmetros do motor e a atualização do modelo do motor por meio de tabelas de referência. Para isso, o controle de corrente é realizado, onde os parâmetros do motor são coletados e, em um segundo momento, utilizados para atualizar os parâmetros no modelo durante o controle de velocidade. Os resultados são obtidos por meio de simulação e confirmam a eficácia dessa abordagem, demonstrando melhorias na precisão do controle e na eficiência do sistema.

**Palavras-chave**—Método dos Mínimos Quadrados Recursivos, Motores Síncrona de Relutância, Comissionamento, Controle Preditivo Baseado em Modelo com Conjunto Finito de Controle.

## I. INTRODUÇÃO

Motores de Relutância Síncrona (em inglês, Synchronous Reluctance Machines - SynRM) são competitivos e atraentes para aplicações comerciais e acadêmicas devido à sua alta eficiência em uma ampla faixa de condições de operação [1]. Os SynRMs possuem uma estrutura construtiva simples, semelhante à de um Motor de Indução (Induction Motor - IM), e são desprovidos de ímãs, o que reduz os custos de fabricação, considerando o elevado preço e a demanda por ímãs de terras raras. A ausência de ímãs no rotor também elimina o risco de desmagnetização, tornando-os mais duráveis, especialmente em aplicações de baixa demanda de potência [2]. Além disso, os motores SynRM podem operar eficientemente em níveis de temperatura mais baixos que os IMs para a mesma potência, oferecem uma operação suave e silenciosa e permitem flexibilidade no controle, tornando-os ideais para aplicações de velocidade variável [3]. O torque produzido pelo SynRM é puramente de relutância, gerado pela diferença entre as indutâncias nos eixos direto (d) e de quadratura (q). Os modelos matemáticos que descrevem o SynRM apresentam elevada dependência de parâmetros, especialmente das indutâncias, que, devido aos efeitos da saturação magnética, variam em magnitude conforme as amplitudes de corrente [4]. O desconhecimento desses parâmetros em diferentes pontos de operação pode reduzir a eficiência e a capacidade de fornecimento de torque, resultando em uma

caracterização inadequada da planta e afetando diretamente o projeto dos controladores de malha, que são fortemente dependentes desses parâmetros.

A obtenção dos parâmetros do SynRM, como resistência e indutâncias, pode ser realizada por meio do comissionamento do motor. Em [5] e [6], as indutâncias do motor são determinadas por meio de medições, onde é aplicada uma referência de corrente pulsada em malha fechada, em vez de uma referência de tensão pulsada em malha aberta. A resposta da máquina é medida, e amostras de tensão e corrente são processadas em tempo real para calcular os enlaces de fluxo e as indutâncias. Esse método, realizado no modo de controle de corrente, permite modificar a constante de tempo do sistema, de modo que um número suficiente de amostras esteja disponível durante o transiente, melhorando a precisão da medição em máquinas com constantes de tempo menores. Por outro lado, em [7] e [8], os parâmetros do motor são obtidos via software, por meio de estimação online de um SynRM. Os autores propõem a utilização do Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) para a obtenção das indutâncias e da resistência do estator, permitindo a determinação dos parâmetros sem a necessidade de ajustes mecânicos.

O presente artigo apresenta uma abordagem para a estimação dos parâmetros elétricos do motor, como as indutâncias  $L_d$  e  $L_q$ , e dos parâmetros mecânicos, como atrito viscoso ( $B$ ) e momento de inércia ( $J_i$ ), que, por meio de tabelas de referência, fornecem ao sistema de controle a atualização dos parâmetros de acordo com o ponto de operação. O controle do SynRM é realizado por meio do Controle Preditivo de Modelo com Conjunto de Controle Finito (em inglês, Finite Control Set Model Predictive Control - FCS-MPC), que permite o rastreamento das correntes de referência com a atualização paramétrica do modelo, por meio dos vetores de comutação para um inversor de dois níveis, com base na minimização da função de custo [9]. A estimação paramétrica é realizada através do comissionamento do motor, com a aplicação de degraus de torque no SynRM. A estratégia de Máximo Torque por Ampere (MTPA) é utilizada para a geração das correntes de referência, enquanto a referência de velocidade é fornecida por um IM, conforme descrito em [10]. Os parâmetros estimados são utilizados para o controle de velocidade do motor por meio de tabelas de referência.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção II apresenta a modelagem matemática do SynRM; a seção III

descreve a estrutura do Controle Preditivo baseado em Modelo; o seção IV apresenta o Método de Mínimos Quadrados Recursivos; a seção V mostra os resultados obtidos e a seção VI apresenta as conclusões do artigo.

## II. MODELAGEM DO SYNRM

### A. Modelo Matemático

O modelo dinâmico elétrico do SynRM é representado no sistema de coordenadas síncronas com a posição rotórica alinhada com o eixo de menor relutância no referido referencial. No referido sistema, o eixo direto representa a direção de menor relutância magnética, enquanto o eixo de quadratura representa a direção de maior relutância. O modelo apresentado despreza os efeitos de saturação magnética cruzada e as perdas no ferro. As equações que descrevem a relação entre as tensões no referencial síncrono são fundamentais para a representação da dinâmica do sistema. As tensões sintetizadas pelo conversor,  $u_d$  e  $u_q$ , são expressas por (1):

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d, \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $\psi_d$  e  $\psi_q$  representam o fluxo em eixo direto e quadratura,  $R_s$  a resistência do estator,  $\omega_e$  a velocidade angular elétrica,  $i_d$  e  $i_q$  as correntes do estator no referencial síncrono. O torque eletromagnético é dado por:

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d), \quad (2)$$

onde  $T_e$  representa o torque eletromagnético. Desconsiderando as indutâncias mútuas,  $L_{dq} = L_{qd} \approx 0$ , os fluxos dos eixos são dados pela relação direta entre o produto da própria indutância do eixo pela corrente como segue:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d \\ \psi_q &= L_q i_q. \end{aligned} \quad (3)$$

### B. Máximo Torque por Ampere

A técnica Máximo Torque por Ampere (MTPA) é amplamente utilizada para determinar as menores correntes de referência possíveis que resultam o torque eletromagnético desejado. O MTPA pode ser obtido através da representação das correntes  $i_d$  e  $i_q$ , estão representadas em coordenadas retangulares, entretanto elas podem ser representadas em coordenadas polares, onde a magnitude é dada por (4):

$$I_s^2 = i_d^2 + i_q^2, \quad (4)$$

onde  $I_s$  é a corrente do estator. As correntes  $i_d$  e  $i_q$  podem ser representadas em coordenadas polares:

$$\begin{aligned} i_d &= I_s \sin(\phi) \\ i_q &= I_s \cos(\phi). \end{aligned} \quad (5)$$

Dessa forma, substituindo as equações (3) em (2) e utilizando (5), obtém-se a relação entre o torque eletromagnético, a corrente do estator e o ângulo da trajetória das correntes eixos síncronos. A obtenção do MTPA será realizada obtendo o ângulo  $\phi$  que maximiza o conjugado eletromagnético para uma dada amplitude de corrente  $I_s$ . Assim, vamos fazer :

$$\left. \frac{dT_e}{d\phi} \right|_{\max} = 0, \quad (6)$$

resolvendo a equação (6), temos:

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{d\phi} &= \frac{3}{2}pI_s^2 \frac{d}{d\phi} [(L_d - L_q) \sin(\phi) \cos(\phi)] = 0 \\ \frac{3}{2}pI_s^2 [(L_d - L_q) \{-\sin^2(\phi) + \cos^2(\phi)\}] &= 0 \\ \cos(2\phi) &= 0 \\ \phi &= 45^\circ. \end{aligned} \quad (7)$$

Dessa forma, utilizando a expressão (5), resulta em:

$$i_d = i_q. \quad (8)$$

## III. MODEL PREDICTIVE CONTROL - FINITE CONTROL SET

O FCS-MPC é utilizado para o controle das correntes do inversor, através da seleção entre oito possíveis vetores de comutação para um inversor trifásico de dois níveis. O vetor de comutação a ser implementado em cada período de amostragem é definido com base na minimização de uma função custo, derivada das correntes do motor. A minimização da função de custo gera um índice  $i$  que determina o vetor de comutação do inversor. As correntes do motor, apresentadas em (9), são calculadas duas amostras à frente do instante  $k$  e são utilizadas para a determinação da função custo que é apresentada a seguir:

$$J = (i_{dref} - i_{dk+2})^2 + (i_{qref} - i_{qk+2})^2, \quad (9)$$

onde  $i_{dref}$  e  $i_{qref}$  são as correntes oriundas pelo MTPA. A estrutura simplificada do FCS-MPC é apresentada na Figura 1:

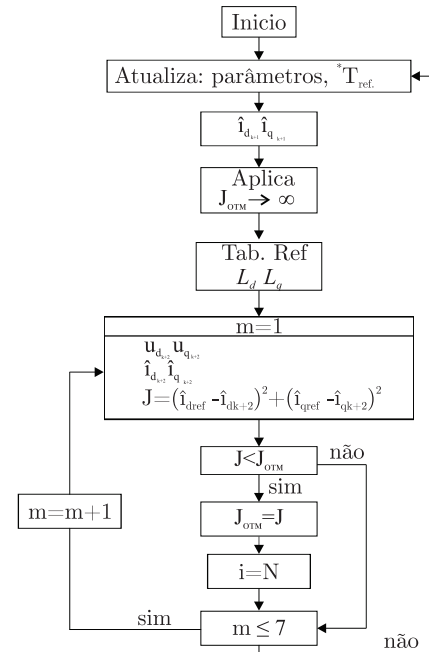
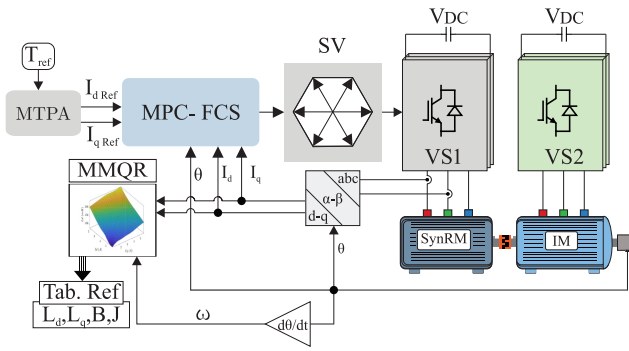


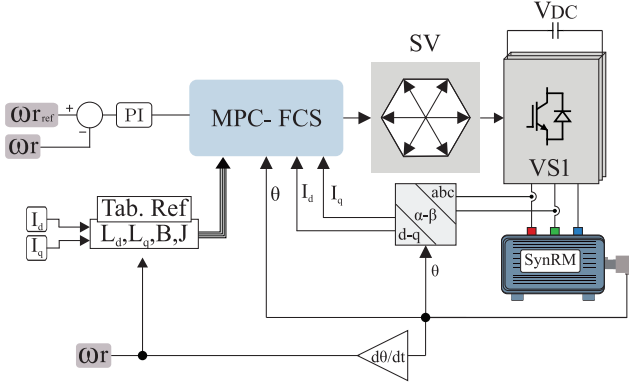
Figura 1: Estrutura do FCS-MPC aplicado ao SynRM.

A Figura 1 apresenta o comportamento do FCS-MPC para o acionamento do SynRM. A predição baseada em modelo

é realizada utilizando parâmetros médios fixos, assumindo que esses valores sejam constantes dentro de um período de amostragem, nesse caso 30 kHz. O controle de velocidade, por sua vez, é efetuado considerando as tabelas de referência dos parâmetros estimados e a atualização dos vetores de comutação. A estrutura do controle é utilizada para dois diferentes cenários, conforme apresentado na Figura 2. A Figura 2a é utilizada para o controle de corrente do motor, e os parâmetros mecânicos e elétricos do motor são estimados através de um comissionamento, no qual é imposta uma referência de *torque* e velocidade. Nesse cenário, o IM é utilizado como referência de velocidade e o controle de corrente é realizado no SynRM. A Figura 2b, por sua vez, apresenta o controle de velocidade do SynRM, sem a presença de carga conectada ao eixo, com a utilização dos parâmetros estimados no comissionamento.



(a) Controle de corrente do SynRM e estimação paramétrica.



(b) Controle de velocidade do SynRM.

Figura 2: Modelo preditivo baseado em Modelo aplicado ao SynRM.

#### IV. ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA DO SYNRM DRIVE

Para o controle de velocidade do motor, a obtenção dos parâmetros mecânicos  $B$  e  $J$  pode ser de grande valia para a sintonia do controlador. Por outro lado, visando a imposição de um torque eletromagnético, o conhecimento das indutâncias  $L_d$  e  $L_q$  é de vital importância, assim como a utilização de um bom controlador de corrente.

Note que o controlador de corrente escolhido pode se beneficiar de valores de  $L_d$  e  $L_q$  que estejam próximos dos valores reais. Assim, nesta seção, será explorado o uso do Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) para a

estimação dos parâmetros elétricos e mecânicos, tanto para o controle de corrente quanto para o controle de velocidade.

Inicialmente, será brevemente descrito o método de mínimos quadrados, que será então aplicado para a estimação dos parâmetros mecânicos e elétricos durante o processo de comissionamento. A estrutura do método é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} Y_k &= \Phi_k \hat{\theta}_k, \\ \hat{\theta}_k &= \hat{\theta}_{k-1} + K_k [Y_k - \Phi_k \hat{\theta}_{k-1}], \\ P_k &= \frac{1}{\lambda} [I - K_k \Phi_k] P_{k-1}, \\ K_k &= \frac{P_{k-1} \Phi_k^T}{\lambda + \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^T} \end{aligned} \quad (10)$$

onde  $Y_k$  é o vetor de saída,  $\Phi$  representada a matriz das medidas,  $\hat{\theta}$  são os parâmetros estimados e  $P$  é a matriz de covariância que é definida entre  $10^4$  a  $10^7$ ,  $\lambda$  é o fator de esquecimento que é definido entre 0,9 a 0,99 e  $K$  representa a matriz de ganhos do estimador.

##### A. Estimação dos parâmetros mecânicos

A estimação de parâmetros mecânicos, atrito viscoso e momento de inércia, são fundamentais para cálculos de ganhos do controlador PI, apresentados na Figura 2a, e representação do modelo do motor. Esses parâmetros podem ser estimados a partir do modelo. O modelo contínuo da velocidade do rotor é dado por:

$$\dot{\omega}_r = -\frac{B}{J_i} \omega_r + \left( \frac{T_e - T_L}{J_i} \right), \quad (11)$$

onde  $B$  representa o atrito viscoso,  $J_i$  o momento de inércia e  $T_L$  o torque de carga. A diferença entre o torque eletromagnético e de carga são denominados por  $\Delta$ , resultando em:

$$\dot{\omega}_r = -\frac{B}{J_i} \omega_r + \frac{1}{J_i} \Delta \quad (12)$$

O modelo contínuo é discretizado por meio do método de Euler que resulta em:

$$\omega_{rk} = \omega_{rk-1} \left( 1 - \frac{B}{J_i} T_s \right) + \frac{T_s}{J_i} \Delta_{k-1}. \quad (13)$$

Considerando (13), os parâmetros são evidenciados por  $\gamma_{1,2}$ , apresentadas em (14), resultam em:

$$\omega_{rk-1} = \omega_{rk-1} \gamma_1 + T_s \Delta_{k-1} \gamma_2, \quad (14)$$

onde  $T_s$  representa o período de amostragem do controlador.  $Y_{ek} = \omega_{rk-1}$  representa a saída do sistema e os parâmetros mecânicos,  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , são definidos por:

$$\hat{\theta}_{mk} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{BT_s}{J_i} \\ \frac{1}{J_i} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

onde  $\theta_m$  representa a matriz de parâmetros mecânicos e os regressores do modelo mecânico,  $\Phi_m$ , são dados por:

$$\Phi_{mk} = [\omega_{rk-1} \quad \Delta_{k-1} T_s]. \quad (16)$$

Utilizando as equações apresentadas em (10),  $J_i$  e  $B$  podem ser obtidos a partir de (15).

$$J_i = \frac{1}{\gamma_2}, B = \frac{J_i(1 - \gamma_1)}{T_s}. \quad (17)$$

## B. Estimação dos parâmetros elétricos

O modelo de estimação dos parâmetros elétricos são relacionados às indutâncias de eixo direto e quadratura. A partir de (1), as correntes em tempo contínuo do motor são obtidas e são discretizadas, por meio do método de Euler, que resultam em:

$$\begin{aligned} i_{dk} &= \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_{dk-1} + \frac{\omega_{emk-1} T_s L_q i_{qk-1}}{L_d} + \frac{T_s u_{dk-1}}{L_d}, \\ i_{qk} &= \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_{qk-1} - \frac{\omega_{emk-1} T_s L_d i_{dk-1}}{L_q} + \frac{T_s u_{qk-1}}{L_q}. \end{aligned} \quad (18)$$

As entradas do modelo são representadas pelos valores medidos, dados por corrente, tensão e velocidade angular elétrica. A saída do sistema, é dada pela corrente utilizada para estimação, sendo  $Y_k = i_{dk}$ . A corrente  $i_{dk}$  é apresentada em (19) onde os parâmetros  $\sigma_{1,2,3}$  são evidenciados, como apresentado a seguir:

$$i_{dk} = \sigma_1 i_{dk-1} + \sigma_2 T_s i_{qk-1} \omega_{emk-1} + \sigma_3 T_s u_{dk-1} \quad (19)$$

A matriz de parâmetros resultantes, por sua vez, é dada por:

$$\hat{\theta}_{ek} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) \\ \frac{L_q}{L_d} \\ \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Enquanto a matriz de regressores é dada por:

$$\Phi_{ek} = [i_{dk-1} \quad \omega_{em} T_s i_{qk-1} \quad T_s u_{dk-1}] \quad (21)$$

As indutâncias  $L_d$  e  $L_q$  são obtidas por:

$$\begin{aligned} L_d &= \frac{1}{\sigma_3}, \\ L_q &= \sigma_2 L_d. \end{aligned} \quad (22)$$

## V. RESULTADOS

Os resultados são divididos em dois cenários de aplicação, controle de corrente e de velocidade. A atualização paramétrica do modelo é realizada *offline*, pois distintas estruturas de controladores são utilizadas. Os resultados são realizados em ambiente computacional, onde um inversor de dois níveis é controlado utilizando o FCS-MPC com  $30kHz$  de amostragem. Para representar a dinâmica das indutâncias do motor são utilizadas funções de referência de  $L_d$  e  $L_q$  em função das correntes  $i_d$  e  $i_q$ . A Tabela I apresenta os parâmetros do SynRM utilizados em simulação.

Tabela I: Parâmetros do Motor

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência Nominal	$P$	2,2 kW
Tensão	$V_{DC}$	400 V
Corrente Nominal	$I_n$	5,5 A
Velocidade Nominal	$n$	157 rad/s
Resistência Nominal do Estator	$R_s$	2,407 $\Omega$
Número de Pares de Polos	$n_p$	2

## A. Controle de corrente

O controle de corrente é utilizado para o comissionamento do SynRM, por meio da aplicação de referências de *torque* em degraus. O ângulo para mínima corrente para o *torque* desejado, conforme apresentado em (7), é mantido constante para todos os pontos de operação, permitindo a obtenção simplificada das correntes  $i_d$  e  $i_q$ , enquanto a referência de velocidade é fornecida pelo IM. As respostas aos degraus de *torque*, as correntes  $dq$  e a velocidade de referência é apresentado na Figura 3. A aplicação de degraus de referência

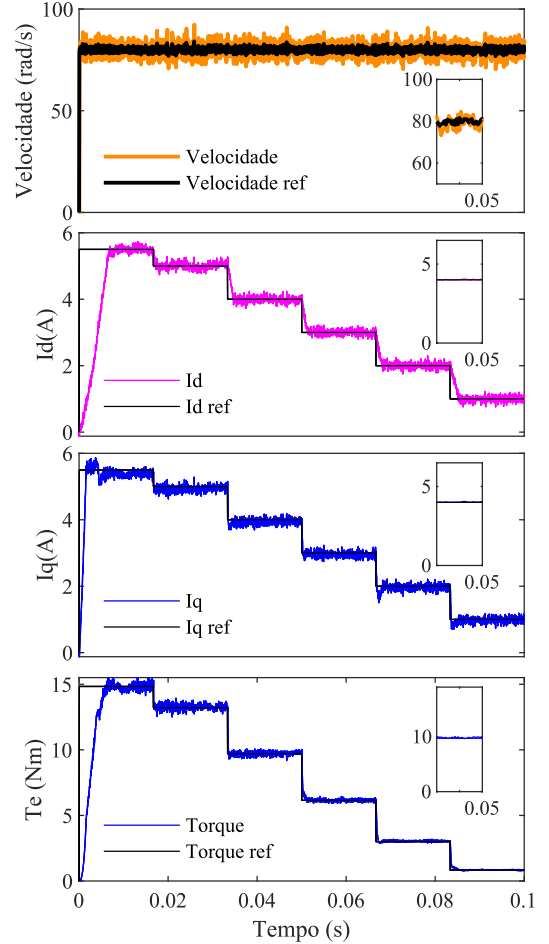
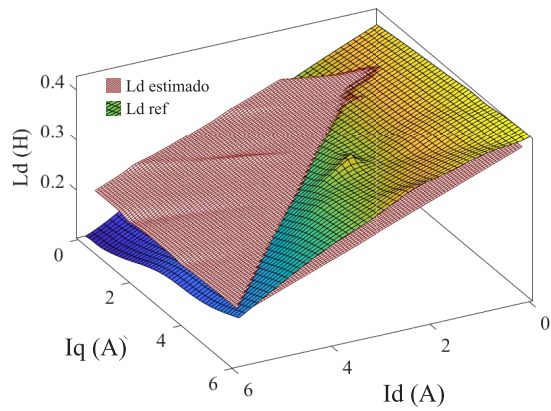


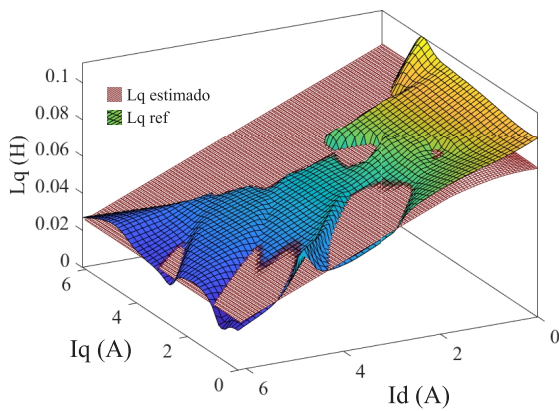
Figura 3: Estimação dos parâmetros elétricos via comissionamento.

ao SynRM permitiu a estimação dos parâmetros elétricos na Figura 4 e o erro da estimação em 5, os parâmetros mecânicos são apresentados na Figura 6. Os parâmetros  $B$  e  $J_i$  são obtidos a partir da inicialização da estimação com valores aleatórios e os valores utilizados são obtidos por meio de suas médias estimadas. Os parâmetros utilizados para o controle de velocidade foram determinados pela média das estimativas, enquanto as indutâncias foram interpoladas para obtenção dos valores em função das correntes  $dq$ . O erro de estimação das indutâncias em relação aos valores de referência é apresentado na Figura 5.

A estimação dos parâmetros elétricos apresentou elevada magnitude, especialmente para correntes elevadas, devido à



(a)  $L_d$



(b)  $L_q$ .

Figura 4: Estimação dos parâmetros elétricos.

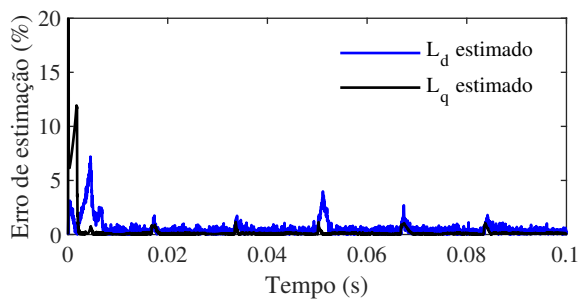


Figura 5: Erro de estimação das indutâncias.

inicialização do acionamento do motor com parâmetros aleatórios, que são ajustados com o aumento das interrupções no acionamento.

### B. Controle de velocidade

O controle de velocidade é utilizado para validar os parâmetros tabelados na subseção V-A. Nesta seção de controle, as correntes de referência são geradas pela malha de velocidade, que é controlada por um controlador Proporcional-Integral (PI). A Figura 7 apresenta os degraus de velocidade aplicados ao SynRM:

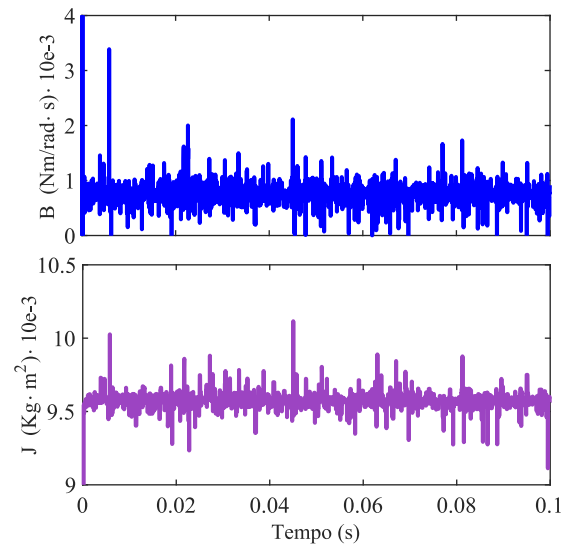


Figura 6: Estimação dos parâmetros mecânicos.

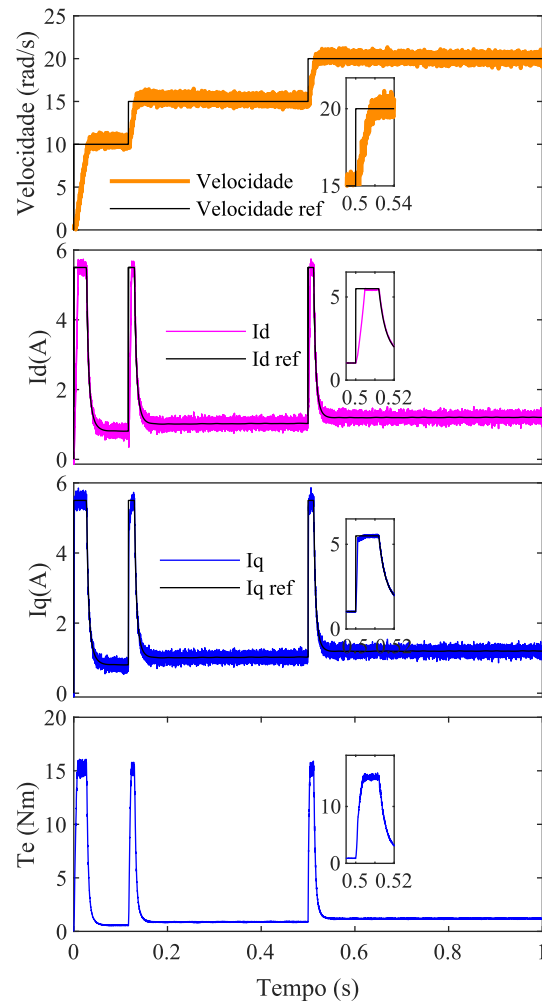


Figura 7: Resultados para controle de velocidade.

Os resultados apresentados mostraram capacidade de atualização paramétrica e controle de velocidade satisfatório. As correntes dq foram sintetizadas para demanda mudança

de velocidade, tal como mostra o *torque* eletromagnético para suprir as perdas do SynRM. Além disso, a estratégia de estimação utilizada permite obtenção *offline* ou *online*, possibilitando utilização da estratégia para diferentes modelos de motores.

## VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem sobre o comissionamento do SynRM utilizando o Método de Mínimos Quadrados Recursivos. A implementação do FCS-MPC foi utilizada tanto para o controle de corrente quanto para o comissionamento do motor. Em um cenário adicional, foi realizado o controle de velocidade do SynRM com atualização paramétrica. Os resultados demonstraram que, mesmo na presença de ruído nas medições, inserido em simulação, o método abordado conseguiu manter uma capacidade robusta de estimação paramétrica. A combinação do Método de Mínimos Quadrados Recursivos com o FCS-MPC mostrou-se eficaz para diferentes pontos de operação. Portanto, este trabalho apresenta uma solução robusta e eficaz para a estimação e controle de SynRMs, demonstrando potencial para controle de corrente e velocidade sem a necessidade de ensaios experimentais para levantamento dos parâmetros do motor.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código Financeiro 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq. Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - Fundep Mover/Linha V 27192.03.01/2020.12-00, Mover/Linha V 27192.03.01/2022.04-00 e FAPERGS T.O.21/2551- 0002147-0.

## REFERÊNCIAS

- [1] K. B. Tawfiq, M. N. Ibrahim, E. E. El-Kholy, and P. Sergeant, *Performance Improvement of Synchronous Reluctance Machines—A Review Research*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 10, pp. 1-11, 2021, doi: 10.1109/TMAG.2021.3108634.
- [2] W. Huang, J. Wang, J. Zhao, L. Zhou, and Z. Zhang, *Demagnetization Analysis and Magnet Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Power Steering Applications*, in *2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, doi: 10.1109/CIYCEE49808.2020.9332771, pp. 1-6, 2020.
- [3] J. Islam, S. Nategh, R. R. Moghaddam, and A. Boglietti, *Different Traction Motor Topologies Used in E-mobility: Part I: Solutions without magnet*, in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270776, vol. 1, pp. 131-137, 2020.
- [4] P. Niazi and H. A. Toliyat, "Online Parameter Estimation of Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 609-615, 2007. doi: 10.1109/TIA.2006.890021. keywords: Parameter estimation, Reluctance motors, Synchronous motors, Torque, Control systems, Permanent magnet motors, Production, Couplings, Sensorless control, Magnetic flux, Online parameter estimation, Parameter variation, Permanent-magnet assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM), SynRM, System identification.
- [5] Rajendra Thike and Pragasen Pillay, *Automatic inductance measurements of synchronous reluctance machines including cross-saturation using real-time systems*, *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 6121–6127, 2018.

- [6] R. Thike and P. Pillay, "Characterization of a variable flux machine for transportation using a vector-controlled drive," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 494–505, 2017.
- [7] R. Yang, T. Sun, S. He, W. Feng, J. Liang, and Y. Chao, "Online Full-parameter Estimation of SynRM Based on the RLS and LMS Algorithm," in *2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, 2021, pp. 389-393. doi: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475559.
- [8] Anantaram Varatharajan, Paolo Pescetto, and Gianmario Pellegrino, *Sensorless self-commissioning of synchronous reluctance machine with rotor self-locking mechanism*, *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 812–817, 2019.
- [9] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, and U. Ammann, "Predictive current control of a voltage source inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 495-503, 2007.
- [10] S. M. Ferdous, P. Garcia, M. A. M. Oninda, and M. A. Hoque, "MTPA and field weakening control of synchronous reluctance motor," in *2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 598–601, IEEE, 2016.