

# Controle e Simulação de um Sistema Armazenador de Energia Cinética (*flywheel*) com Máquina de Relutância Chaveada de Alta Velocidade com Rotor Externo - Remoção do Sensor de Posição usando a Lógica *Fuzzy*

Janito dos Santos Ramos\* Luís Guilherme Barbosa Rolim\*

\* Laboratório de Eletrônica de Potência, Programa de Engenharia  
Elétrica - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de  
Janeiro, Brazil, (e-mails: janito.ramos@coppe.ufrj.br,  
rolim@poli.ufrj.br).

**Abstract:** This paper presents the estimation of the rotor position of a switched reluctance machine - SRM 6/4 with external rotor, operating at high speed (up to 50 krpm), in a Kinetic Energy Storage System (SAEC) - flywheel. The rotor position can be estimated using the phase current and flux linkage relationship, and rule bases based on the SRM magnetization curve. The SAEC is implemented in Matlab/Simulink and its control is performed in the Texas Instruments DSP (Digital signal processor), Delfino F28379D, using the Processor-in-the-loop (PIL) simulation technique. The simulation results are presented to show how the developed sensorless scheme works. Implementations are analyzed and optimized to be able to run on a real system using the same microprocessor model.

**Resumo:** Este artigo apresenta a estimação da posição do rotor da máquina de relutância chaveada - SRM 6/4 com rotor externo, operando em alta velocidade (até 50 krpm), em um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC) - *flywheel*. A posição do rotor pode ser estimada usando a relação corrente de fase e fluxo enlaçado, e bases de regra baseadas na curva de magnetização da SRM. O SAEC é implementado no *Matlab/Simulink* e o seu controle é realizado no DSP (*Digital signal processor*) da *Texas Instruments*, Delfino F28379D, utilizando a técnica de simulação *Processor-in-the-loop* (PIL). Os resultados de simulação são apresentados para mostrar o funcionamento do esquema *sensorless* desenvolvido. São analisadas e otimizadas as implementações para ser capaz de rodar num sistema real utilizando o mesmo modelo de microprocessador.

**Keywords:** Switched reluctance machine; High speed; Kinetic energy store; Position estimation; Fuzzy logic.

**Palavras-chaves:** Máquina de relutância chaveada; Alta velocidade; Armazenador de energia cinética; Estimação de posição; Lógica *fuzzy*.

## 1. INTRODUÇÃO

As máquinas de relutância chaveada (SRM) ganharam força no mercado altamente competitivo de acionamentos de máquinas de velocidade variável (Kachapornkul et al., 2022). A sua simplicidade intrínseca e baixo custo, as tornam adequadas para muitas aplicações comerciais como aeroespacial, automotivo, eletrodoméstico, etc. (Kachapornkul et al., 2022; Zhou et al., 2017; Ullah et al., 2019; Castano et al., 2018). Em um acionamento da SRM, a posição do rotor deve ser conhecida, pois, a excitação das fases da máquina precisa ser sincronizada com a posição do rotor (Lan et al., 2021; Yu et al., 2019).

A entrada da SRM nas aplicações sensíveis das indústrias provou a necessidade de métodos de detecção de posição do rotor altamente confiáveis e tolerantes às falhas (Pires et al., 2020). Um *encoder* rotativo, *resolver*, sensores de

efeito *Hall* ou sensores ópticos são geralmente empregados para determinar a posição do rotor. No entanto, esses sensores de posição discretos não apenas adicionam complexidade e custo ao sistema, mas também tendem a reduzir a confiabilidade do sistema de acionamento (Gupta and Kumar, 2010; Cheok and Ertugrul, 1999).

Assim em muitos sistemas, vantagens podem ser encontradas na eliminação desses sensores. Esses benefícios incluem a eliminação das conexões elétricas aos sensores, redução do tamanho, baixa manutenção e insuscetibilidade a fatores ambientais. Assim, uma gama diversificada de métodos de estimação de posição indireta são propostas na literatura (Gupta and Kumar, 2010; Cheok and Ertugrul, 1999; Domínguez-Navarro et al., 2018; Wang et al., 2014).

Existem alguns problemas práticos na implementação dos métodos de estimação de posição. Isso se deve ao fato de que os métodos, que monitoram as formas de onda da

máquina, têm algumas limitações e problemas em fornecer medições precisas da posição do rotor continuamente, em baixas e altas velocidades de operação, e várias condições transitórias encontradas em acionamentos da SRM (Cheok and Ertugrul, 1999; Cheok and Wang, 2005). Além disso, os acionamentos de máquinas operam geralmente em ambientes eletricamente ruidosos, portanto, os sistemas de medição práticos estão normalmente sujeitos a erros e imprecisões. Assim, os esquemas de estimativa podem não ser úteis em acionamentos práticos se sua confiabilidade e robustez contra ruído e erro não são comprovadas. Se a confiabilidade de um esquema de detecção de posição sem sensor é baixa, então isso diminui ou cancela quaisquer vantagens de substituir o sensor mecânico (Gupta and Kumar, 2010; Cheok and Ertugrul, 1999).

Assim, este artigo tem como objetivo a estimação da posição do rotor de uma SRM 6/4 a partir da corrente de fase e do fluxo da máquina, utilizando a lógica *fuzzy*. A SRM 6/4 de alta velocidade com rotor externo e sem sensor de posição (*sensorless*), Figura 1, é aplicada a um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC) - *flywheel*. Os parâmetros da SRM são apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A. O rotor externo desempenha de forma integrada a função de volante de inércia, tornando o projeto mecânico mais compacto e robusto.

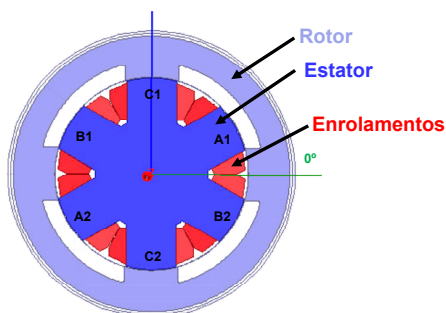


Figura 1. Seção transversal da SRM 6/4 utilizada.

A modelagem do SAEC é implementada no *Matlab/Simulink* e o seu controle é realizado no DSP (*Digital signal processor*) da *Texas Instruments*, Delfino F28379D control-CARD (TMDSCNCD28379D) utilizando a técnica de simulação *Processor-in-the-loop* (PIL). PIL é uma técnica largamente utilizada que consiste em testar o controle digital implementado em um sistema embarcado, controlando uma planta modelada em um simulador (Hisar et al., 2021).

Neste trabalho, o simulador *Matlab/Simulink* faz uma interface de comunicação serial com o microcontrolador F28379D. Esta interface permite transmitir os sinais das medições da planta para o DSP, que realiza o controle e transmite de volta os sinais de atuação. Embora cada ciclo do algoritmo de controle seja executado em tempo real no DSP, a simulação como um todo não é feita em tempo real, devido às limitações de processamento na simulação da planta e ao tempo requerido pela comunicação serial. A Figura 2 apresenta a estrutura básica da simulação PIL com comunicação serial.

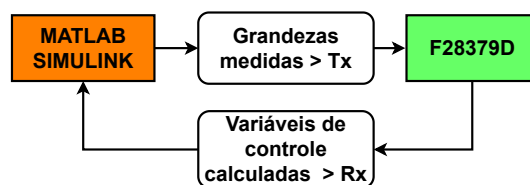


Figura 2. Estrutura PIL com comunicação serial.

## 2. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

O SAEC deste trabalho é utilizado para alimentar uma carga crítica durante a ausência ou interrupção da alimentação principal, por poucos ciclos ou em situações de afundamento de tensão.

O SAEC funciona em três modos de operação:

- **Modo motor** - neste modo de operação a máquina utilizada funciona como motor, e acelera o rotor até atingir a velocidade nominal (50 krpm). Nesta situação a energia é armazenada sob a forma de energia cinética;
- **Modo espera ou *stand by*** - neste modo de operação a máquina funciona como motor em velocidade nominal, e o SAEC, armazenando a energia cinética nominal, espera o momento em que necessita alimentar a carga;
- **Modo gerador ou *fywheel*** - neste modo de operação a máquina funciona como gerador, e transforma a energia cinética armazenada no volante (rotor) em energia elétrica.

A configuração do SAEC utilizada é mostrada na Figura 3, com a carga crítica no barramento CC e o conversor ponte assimétrica (AHB).

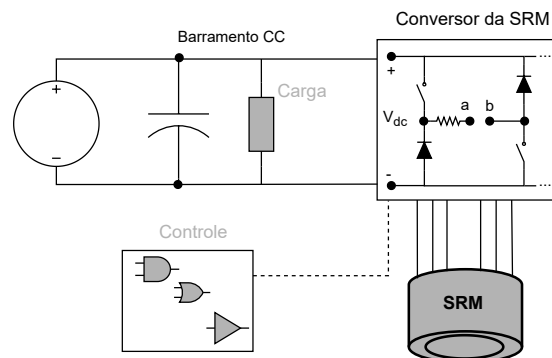


Figura 3. SAEC com carga no barramento CC.

## 3. CONTROLE DA SRM

A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos da SRM com controle em cascata. Na malha interna é realizado o controle da corrente e externamente são implementados os controles da velocidade e tensão do barramento CC, sendo a escolha do último dependente do modo da operação da SRM (Motor ou Gerador).

O esquema *sensorless* proposto baseia-se na estimação da posição do rotor ( $\theta$ ) da SRM usando a lógica *fuzzy*. As entradas do estimador *fuzzy* são a corrente ( $i_{srm}$ ) e o fluxo enlaçado ( $\Phi$ ). O fluxo enlaçado ( $\Phi$ ) é estimado

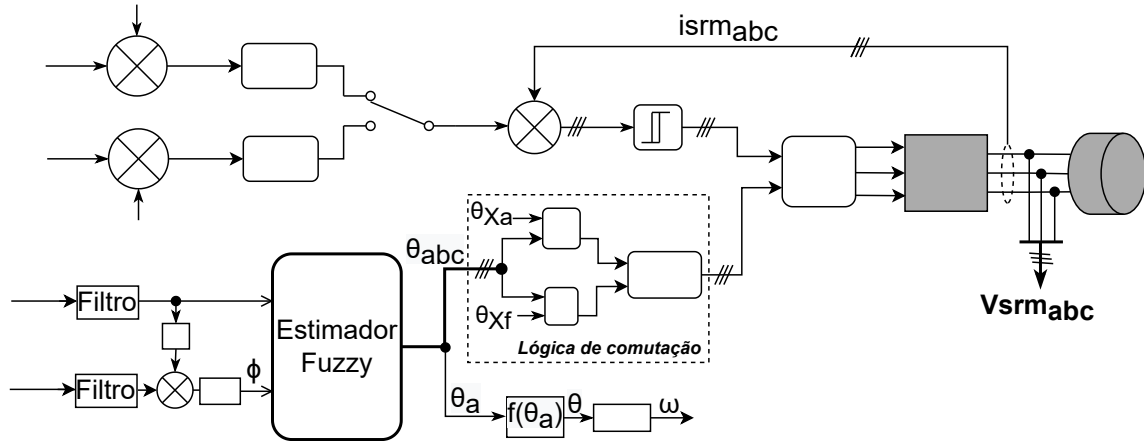


Figura 4. Controle do SAEC usando Estimador de posição através da Lógica fuzzy.

considerando a operação da SRM (Cheok and Ertugrul, 1999; de Araujo Porto Henriques et al., 2011).

O princípio fundamental de operação de um SRM é baseado na variação do fluxo enlaçado ( $\Phi$ ) com a mudança da posição angular do rotor ( $\theta$ ). Assim, a tensão instantânea ( $V_{srm}$ ) nos terminais do enrolamento da SRM é dado por:

$$V_{srm} = r_s \cdot i_{srm} + \frac{d\Phi(\theta, i_{srm})}{dt}, \quad (1)$$

onde  $r_s$  é a resistência do enrolamento.

Para o cálculo de estimação do fluxo enlaçado são usadas a tensão e corrente de fase como entradas, de acordo com a equação (2).

$$\Phi = \int (v_{srm} - r_s \cdot i_{srm}) dt \quad (2)$$

No microcontrolador, o fluxo é calculado usando a equação (3) a seguir, que corresponde à discretização de (2) pelo método trapezoidal.

$$\Phi(n) = \Phi(n-1) + T[v_{srm}(n) - r_s \cdot i_{srm}(n) + v_{srm}(n-1) - r_s \cdot i_{srm}(n-1)]/2 \quad (3)$$

onde T é o tempo de amostragem.

O filtro de primeira ordem, representado na equação (4), é usado para cada corrente e tensão para produzir o ângulo estimado mais refinado.

$$y(n) = 0,95 \times y(n-1) + 0,05 \times x(n) \quad (4)$$

onde  $y[n]$  é a saída,  $y[n-1]$  é a saída anterior e  $x[n]$  é a entrada.

O estimador fuzzy é apresentado com mais detalhes na seção 4. A partir do estimador fuzzy são obtidas as posições das três fases da SRM, que variam de 0 a 90°, e as fases defasadas 30° uma da outra, como mostra a Figura 5.

A posição geral é obtida a partir da posição do rotor da fase A, como apresenta a Figura 6. A velocidade é definida a partir da derivada da posição geral.

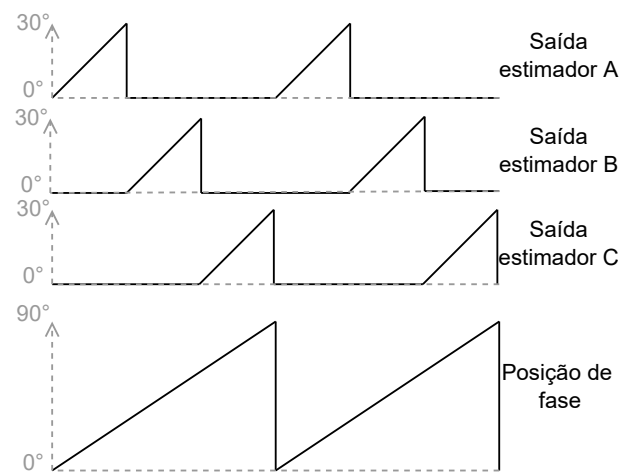


Figura 5. Obtenção das posições das fases.

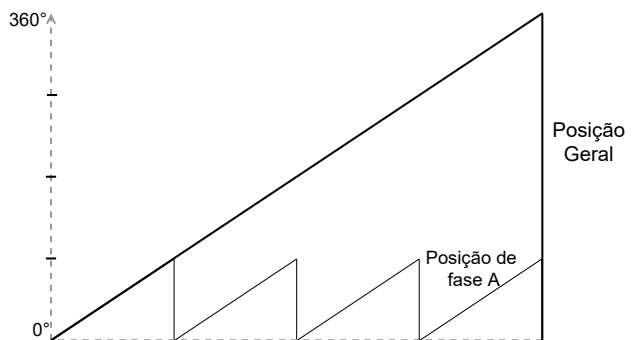


Figura 6. Obtenção da posição geral.

Na lógica de comutação, cada fase da SRM é comutada a partir da respectiva variável  $\theta_{abc}$  e dos ângulos de fechamento ( $\theta_{Xf}$ ) e abertura ( $\theta_{Xa}$ ) indicados. Os ângulos  $\theta_{Xf}$  e  $\theta_{Xa}$  também determinam o modo de operação da SRM. A operação da SRM como gerador corresponde a ângulos entre 0° e 30°. Já para ângulos entre 60° e 90°, a SRM funciona como motor. São aplicados os avanços nos ângulos de fechamento ( $\theta_{Xf}$ ) e a abertura ( $\theta_{Xa}$ ) das chaves dos braços da SRM, para melhorar o seu desempenho.

#### 4. LÓGICA FUZZY PARA OBTENÇÃO DA POSIÇÃO DA SRM

Um componente importante do algoritmo de estimação da posição da SRM baseado em lógica *fuzzy* é o modelo da máquina. O modelo da SRM foi criado com base nas curvas não lineares de corrente  $i(\Phi, \theta)$  e torque  $T_e(\theta, i)$  da máquina obtidas via método de elementos finitos (MEF). Para criar o modelo da lógica *fuzzy* é considerada a curva de magnetização da SRM,  $\Phi(i, \theta)$ , mostrada na Figura 7.

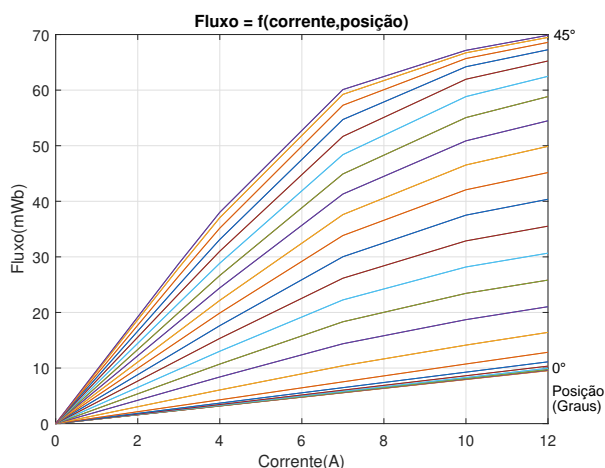


Figura 7. Curva de  $\Phi(i, \theta)$ .

A Figura 8 apresenta a curva de  $\Phi(\theta, i)$ , mostrando cada região de operação da SRM.

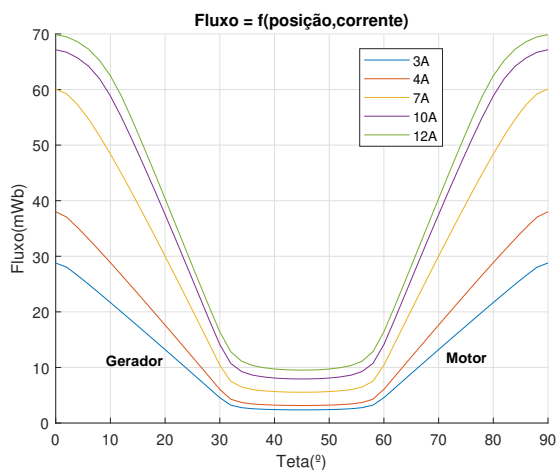


Figura 8. Curva de  $\Phi(\theta, i)$ .

A estimação da posição da SRM baseada na lógica *fuzzy* possui algumas vantagens como, identificação do sistema através de uma abordagem de modelagem e estimativa sem modelo matemático. Portanto, a lógica *fuzzy* é adequada para sistemas desconhecidos, mal definidos ou estruturalmente difíceis de modelar devido à não linearidade existente e outras dificuldades de modelagem. A lógica *fuzzy* também permite a computação rápida (Cheek and Ertugrul, 1999).

Os dados da curva de magnetização para várias posições do rotor são armazenados através da base de regras.

Basicamente, a lógica *fuzzy* é composta por quatro componentes principais como mostrada na Figura 9: fuzzificação, base de regras *fuzzy*, sistema de inferência *fuzzy* e a defuzzificação (Gupta and Kumar, 2010).

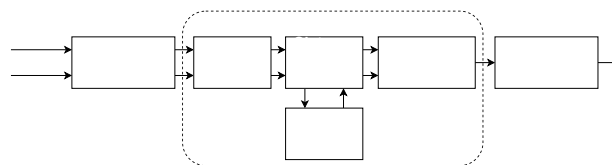


Figura 9. Diagrama de blocos da estrutura básica do estimador *fuzzy*.

As entradas do estimador *fuzzy* são corrente ( $i$ ) e fluxo ( $\Phi$ ), e são definidas para ter uma faixa de 0–18 A e 0–80 mWb, respectivamente. A saída é a posição do rotor ( $\theta$ ), e é definida para a faixa de 0–30° mecânicos. Para cada variável é definida a função de pertinência, variando entre 0 e 1 pu (universo de discurso). Para este trabalho foi escolhida a função de pertinência triangular, e as variáveis  $i$ ,  $\Phi$  e  $\theta$  foram divididas em 19, 33 e 31 regiões, respectivamente, como mostra a Figura 10. A escolha do número de regiões é uma relação entre o número de regras resultantes geradas na base de regras e a precisão desejada (Cheek and Ertugrul, 1999).

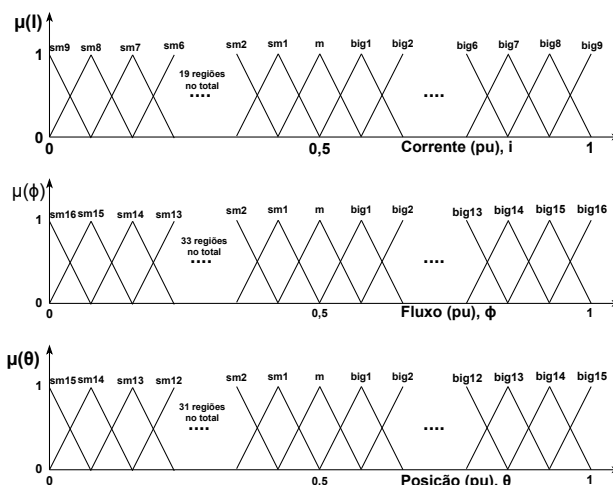


Figura 10. Funções de pertinência de  $i$ ,  $\Phi$  e  $\theta$ .

As variáveis em lógica *fuzzy* possuem conjuntos de valores, caracterizados por rótulos linguísticos, como *SMALL* (sm), *MEDIUM* (m) e *LARGE* (big). Esses rótulos são representados numericamente e caracterizados pela função de pertinência variando de 0 a 1. Assim, os conjuntos *fuzzy* podem ser vistos como representação matemática de valores linguísticos.

As componentes mostradas na Figura 9 usadas nesse trabalho são:

##### 4.1 Fuzzificação

Fuzzificação é a primeira unidade que converte o valor real em valores *fuzzy* usando funções de pertinência de entrada e ganhos. O bloco de pré-processamento é usado

para converter sinais de entrada em valores dentro da faixa necessária para o processamento.

#### 4.2 Sistema de inferência fuzzy

O mecanismo de inferência *fuzzy* usa a base de regras e infere a ação de saída adequada. Uma regra *fuzzy* normalmente tem implicações lógicas “SE-ENTÃO” como segue: SE ( $x$  é A *AND*  $y$  é B) ENTÃO ( $z$  é C) onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são variáveis *fuzzy* e A, B e C são subconjuntos *fuzzy* no universo dos discursos X, Y e Z, respectivamente. A base de regras usada neste trabalho é baseada nas curvas das Figuras 7 e 8 para SRM operando como motor e gerador.

#### 4.3 Defuzzificação

A saída do estimador *Fuzzy* é transformada em valores reais pela defuzzificação. Durante o processamento da lógica *fuzzy* pode ser acionada mais de uma regra pelas entradas. Nesta situação, as regras acionadas serão agregadas usando a união ( $\cup$ ) de cada uma das regras individuais. A agregação das regras *fuzzy* produzirá, assim, um conjunto *fuzzy* de saída agregado no domínio do ângulo. No entanto, um único valor numérico de posição é necessário e, assim, o conjunto *fuzzy* de saída é então convertido em um único valor do ângulo ( $\theta_{out}$ ) usando defuzzificação. Neste trabalho foi utilizado o centroide, que retorna o centro de gravidade do conjunto *fuzzy* agregado, como apresenta a equação a seguir:

$$\theta_{out} = \frac{\sum_{x=1}^n \mu(y^x) \times y^x}{\sum_{x=1}^n \mu(y^x)} \quad (5)$$

onde  $\mu(y^x)$  é a saída da função de pertinência agregada para a entrada  $y^x$  no universo do discurso, sendo este discretizado em  $n$  pontos.

Estudos de desempenho foram feitos empiricamente para diferentes funções de implicação e defuzzificação. Devido à baixa complexidade computacional, os métodos de implicação da regra Máximo-Produto e o centroide têm vantagens para implementação do esquema de estimação em sistemas em tempo real sobre outros métodos de processamento de regras, como foi apresentado em (Cheek and Ertugrul, 1999).

## 5. RESULTADOS

O modelo do SAEC implementado no Matlab/Simulink é mostrado na Figura 11. A simulação do SAEC adotou os critérios, considerando o modo de operação da SRM: inicialmente a SRM funciona como motor acelerando o rotor até atingir a velocidade nominal de 50 krpm. Posteriormente a SRM é acionada como gerador, alimentando uma carga no elo CC de 1 kW. A velocidade da SRM diminui até 20 krpm, quando a SRM volta a funcionar como motor.

A Figura 12 apresenta as curvas de resposta de torque, corrente, fluxo e velocidade da máquina.

Quando a SRM opera em velocidades menores, próximas de 5000 rpm, as curvas de resposta têm os perfis das apresentadas na Figura 13.

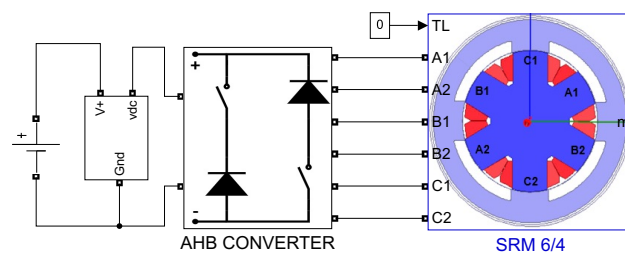


Figura 11. SAEC implementado no Matlab/Simulink.

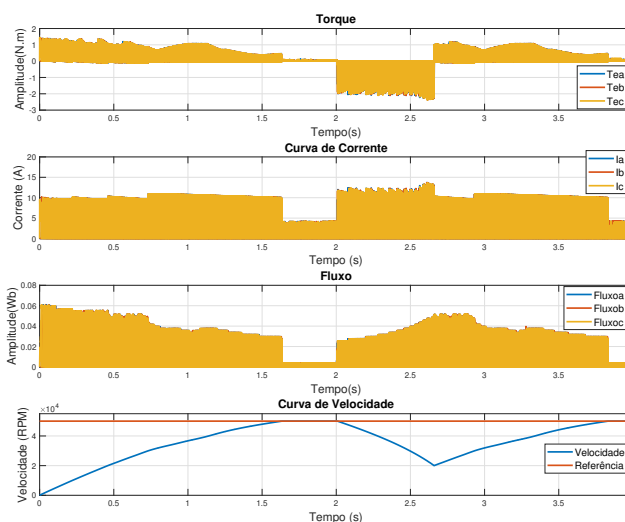


Figura 12. Curvas de resposta da SRM.

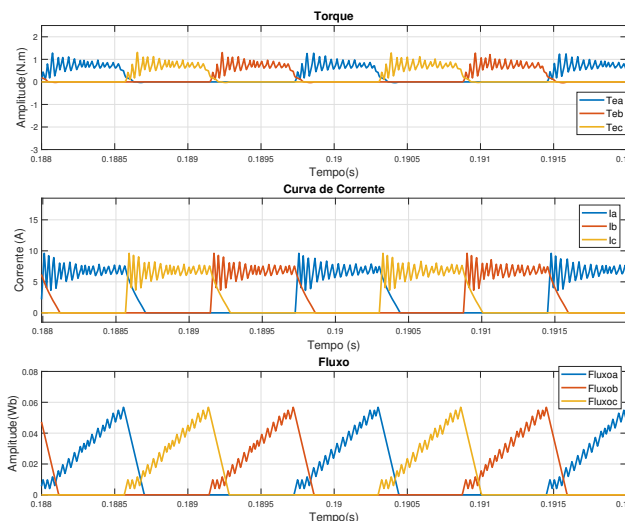


Figura 13. Curvas de resposta da SRM para velocidade próxima de 5000 rpm.

Quando a SRM está próxima de atingir a velocidade nominal, as curvas da máquina são apresentadas na Figura 14.

Quando a SRM é acionada como gerador, as curvas de resposta dessa operação são mostradas na Figura 15.

Durante a operação da SRM como gerador, o SAEC alimenta uma carga crítica, e o conversor AHB controla a tensão do barramento CC. A Figura 16 apresenta as curvas de tensão, corrente e potência medidas na carga crítica.

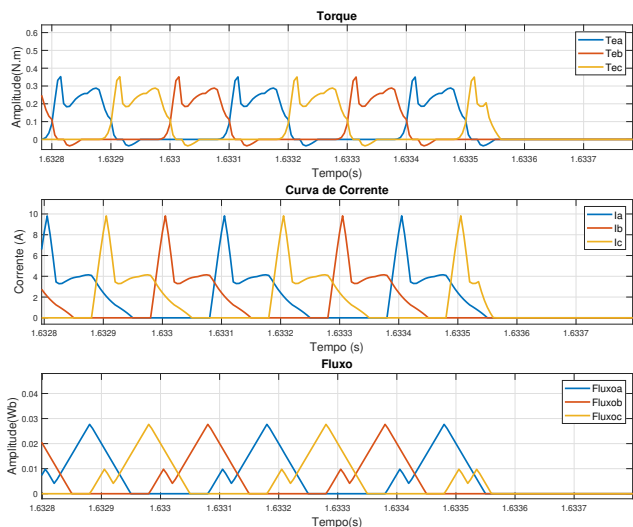


Figura 14. Curvas de resposta da SRM para velocidade próxima de 50 krpm.

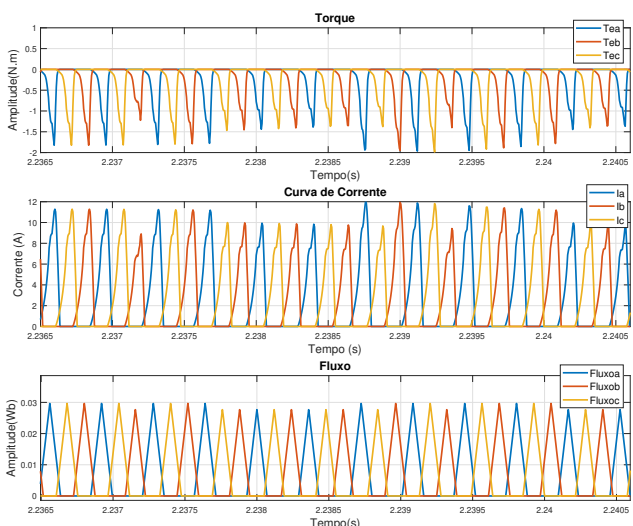


Figura 15. Curvas de resposta da SRM operando como gerador.

As curvas de entradas e saída do estimador *fuzzy* sem o filtro de primeira ordem, em pu, são apresentadas nas Figura 17. A posição do rotor estimada representa a variação de 0 a 30°. A partir das posições estimadas das três fases da SRM, são determinadas as posições das três fases variando de 0 a 90° (0 a  $\pi/2$  radianos).

A Figura 18 apresenta a comparação da curva da posição estimada (0 a  $\pi/2$ ) em relação a posição obtida através do modelo da SRM e o erro em radianos, para uma das fases da SRM operando como motor. A Figura 19 apresenta as mesmas curvas para SRM operando como gerador.

A posição geral é obtida a partir da posição estimada da fase A, e as curvas são apresentadas na Figura 20.

As curvas de resposta apresentadas estão de acordo com o esperado. A velocidade da SRM acompanha a referência desejada. As curvas do torque, da corrente e do fluxo estão como esperados, rastreamento dos valores das curvas da máquina obtidas na simulação por MEF. É visto também

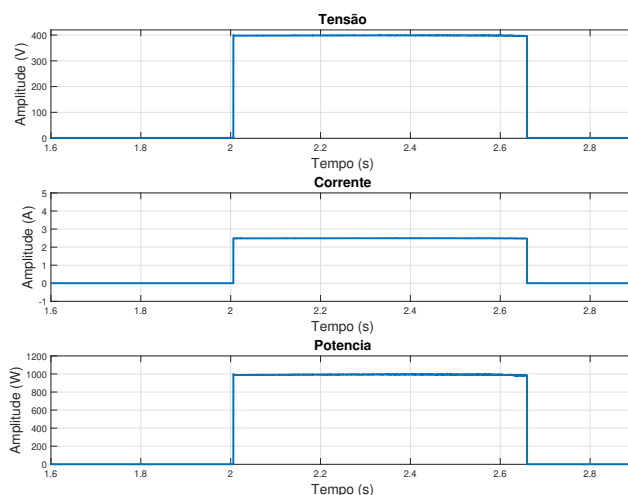


Figura 16. Tensão e corrente e potência gerada sobre a carga.

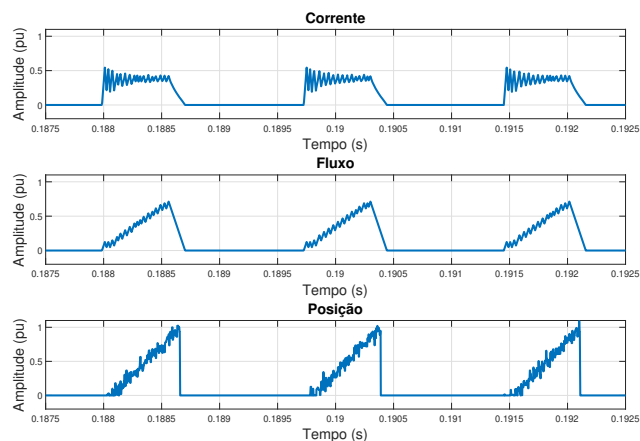


Figura 17. Curvas de resposta de corrente, fluxo e posição estimada pela lógica *fuzzy*.

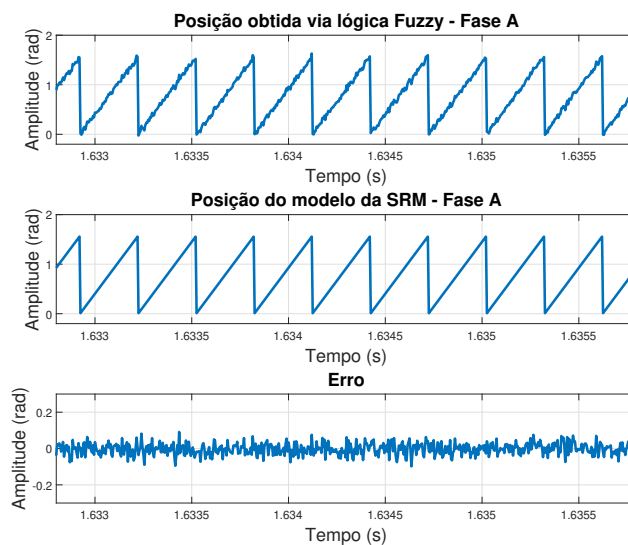


Figura 18. Comparação da posição estimada com a posição obtida do modelo da SRM para operação motora.

que as curvas de torque são positivas para operação motora e negativa para operação geradora. As correntes das fases

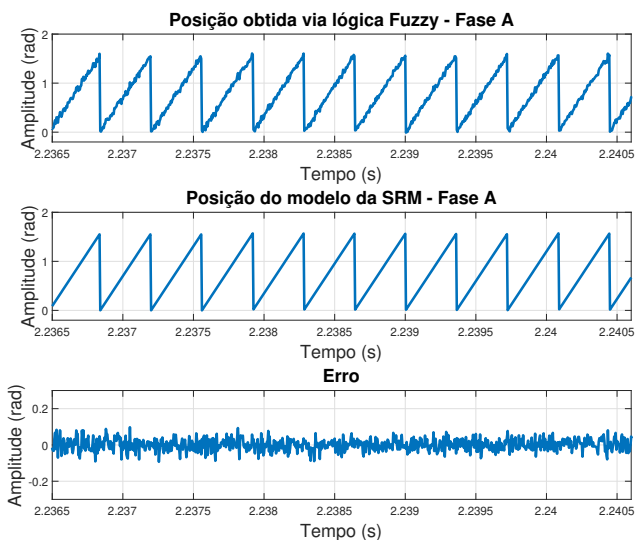


Figura 19. Comparação da posição estimada com a posição obtida do modelo da SRM para operação geradora.

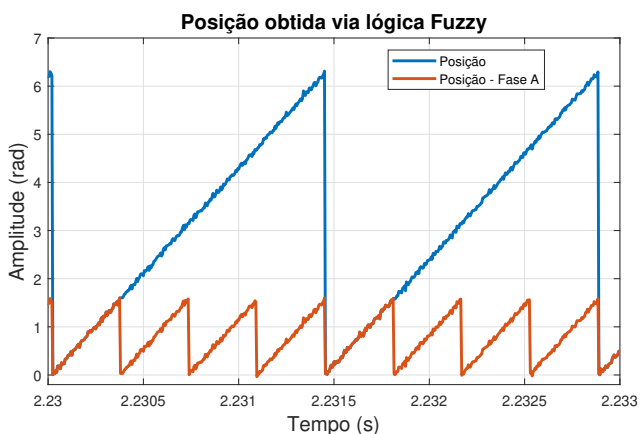


Figura 20. Curvas da posição e da posição da Fase A.

da máquina atingiram valores próximos de 7A na operação motora. Na operação geradora, as correntes atingiram valores próximos de 12A.

Para o melhoramento do desempenho da SRM e o não surgimento do valor de torque negativo na operação motora, principalmente para velocidades elevadas, os ângulos de fechamento ( $\theta_{Xf}$ ) e a abertura ( $\theta_{Xa}$ ) das chaves dos braços foram avançados em até 15°.

A tensão do barramento CC manteve um valor constante, apesar dos distúrbios corrigidos pelo controlador. No instante em que a SRM funciona como gerador a tensão do barramento CC é mantida em 400V pelo conversor da máquina. A SRM foi capaz de alimentar uma carga crítica de 1kW.

O estimador *fuzzy* apresentou resultados satisfatórios e a posição estimada permitiu realizar o controle do SAEC de maneira eficiente, apesar dos ruídos na posição estimada. Os ruídos na posição são devidos aos distúrbios existentes nas entradas do estimador *fuzzy*.

### 5.1 Análise de desempenho

Foi realizada uma análise de desempenho da simulação para verificar se a implementação do controle no microcontrolador é capaz de ser aplicada em um sistema real. O microcontrolador deve ser capaz de adquirir as grandezas medidas amostradas, atualizar as variáveis de controle, processar o algoritmo e enviar as variáveis de atuação das chaves dentro do intervalo de amostragem. Utilizando um *Zero-order hold* (ZOH) de amostragem de 50kHz para as variáveis medidas, o microcontrolador deve ser capaz de executar o algoritmo em menos de 20μs.

Ignorando o tempo de transmissão e recebimento dos sinais e levando em consideração apenas o tempo de processamento, o algoritmo (considerando estimação da posição e controle) gastou 2157 ciclos de *clock*, Figura 21. Como Delfino F28379D tem a velocidade de processamento de 200MHz, significa que o processador gastou 10,785μs, valor inferior ao tempo de amostragem de 20μs. Portanto, o algoritmo desenvolvido é capaz de ser implementado em um sistema real utilizando o microprocessador apresentado.

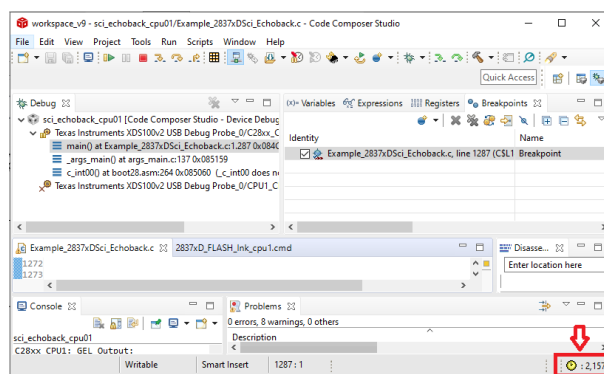


Figura 21. Tempo gasto para o processamento do algoritmo.

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a estimação da posição da SRM para aplicação em um SAEC, usando a lógica *fuzzy*, com SRM operando em alta velocidade. O controle foi realizado no microprocessador F28379D da *Texas Instruments* em sistema *Processor-in-the loop*, onde o sistema de potência foi simulado no ambiente de simulação *Matlab/Simulink*.

Os resultados foram apresentados para diferentes modos de operação da SRM. Os resultados foram satisfatórios e o SAEC foi capaz de alimentar a carga crítica no barramento CC. Como foi apresentado, o controle da SRM depende do conhecimento da sua posição, isto é, a excitação das fases da máquina precisa ser sincronizada com a posição do rotor. Assim, o estimador *fuzzy* apresentou a saída de posição do rotor de maneira eficiente. Apesar de pequenos ruídos na posição estimada, o controle da SRM apresentou ótimos resultados. O estimador *fuzzy* mostrou-se uma ótima opção para substituir os sensores mecânicos. Destaca-se excelente resposta do estimador *fuzzy* para velocidades elevadas.

Para trabalhos futuros, pretende-se: i) realizar o melhoramento do estimador *fuzzy* através de sistemas de trei-

namento; ii) otimização dos ângulos de avanços de fechamento e abertura das chaves do conversor de maneira a obter o melhor rendimento da SRM; iii) desenvolvimento da bancada experimental.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

### REFERÊNCIAS

Castano, S.M., Yang, R., Mak, C., Bilgin, B., and Emadi, A. (2018). External-rotor switched reluctance motor for direct-drive home appliances. In *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 514–521. doi:10.1109/IECON.2018.8591727.

Cheok, A. and Ertugrul, N. (1999). Use of fuzzy logic for modeling, estimation, and prediction in switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(6), 1207–1224. doi:10.1109/41.808012.

Cheok, A. and Wang, Z. (2005). Fuzzy logic rotor position estimation based switched reluctance motor dsp drive with accuracy enhancement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 908–921. doi:10.1109/TPEL.2005.850958.

de Araujo Porto Henriques, L.O., Rolim, L.G., Suemitsu, W.I., Dente, J.A., and Costa Branco, P.J. (2011). Development and experimental tests of a simple neurofuzzy learning sensorless approach for switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(11), 3330–3344. doi:10.1109/TPEL.2011.2129597.

Domínguez-Navarro, J.A., Artal-Sevil, J.S., Pascual, H.A., and Bernal-Agustín, J.L. (2018). Fuzzy-logic strategy control for switched reluctance machine. In *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–5. doi:10.1109/EVER.2018.8362403.

Gupta, R. and Kumar, R. (2010). Sensorless control of switched reluctance motor drive with fuzzy logic based rotor position estimation. *International Journal of Computer Applications*, 1, 74–81.

Hisar, C., Sefa, I., and Altin, N. (2021). Processor-in-the-loop simulation of an interleaved buck converter with matlab/simulink. In *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 1–6. doi:10.1109/ECAI52376.2021.9515058.

Kachapornkul, S., Pupadubsin, R., Somsiri, P., Jitkreayarn, P., and Tungpimolrut, K. (2022). Performance improvement of a switched reluctance motor and drive system designed for an electric motorcycle. *Energies*, 15(3). doi:10.3390/en15030694.

Lan, Y., Benomar, Y., Deepak, K., Aksoz, A., Baghdadi, M.E., Bostanci, E., and Hegazy, O. (2021). Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends. *Energies*, 14(8). doi:10.3390/en14082079.

Pires, V.F., Pires, A.J., Cordeiro, A., and Foito, D. (2020). A review of the power converter interfaces for switched reluctance machines. *Energies*, 13(13). doi:10.3390/en13133490.

Ullah, S., McDonald, S.P., Martin, R., Benarous, M., and Atkinson, G.J. (2019). A permanent magnet assist, segmented rotor, switched reluctance drive for fault tolerant aerospace applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 298–305. doi:10.1109/TIA.2018.2864718.

Wang, C., Deng, Z., Cai, J., and Hu, R. (2014). Indirect position estimation method for switched reluctance motor using searching windings. In *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 3553–3557. doi:10.1109/ICEMS.2014.7014105.

Yu, Z., Chen, Y., Meng, F., Gan, C., and Qu, R. (2019). A phase current sampling strategy for multiphase switched reluctance machines by pulses injection and multi-frequency pluse auxiliary. In *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1–5. doi:10.1109/ICEMS.2019.8921922.

Zhou, Z., Sun, X., Chen, L., Yang, Z., Han, S., Li, K., Zhu, J., and Guo, Y. (2017). A segmented rotor type switched reluctance machine for bsgs of hybrid electric vehicles: Concept, design and analysis. In *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1–4. doi:10.1109/ICEMS.2017.8056169.

### Apêndice A. PARÂMETROS DA SRM 6/4

Tabela A.1. Parâmetros da SRM 6/4.

Parâmetros	Valores
Resistência do enrolamento ( $r_s$ )	0,14 $\Omega$
Velocidade máxima ( $\omega$ )	50 $kRPM$
Momento de inércia (J)	3,05.10 <sup>-3</sup> $kg.m^2$
Número de polos do estator	6
Número de polos do rotor	4
Potência	1 kW