

# Controle e Simulação em Tempo Real de um Sistema Armazenador de Energia Cinética (*flywheel*) com Máquina de Relutância Chaveada de Alta Velocidade com Rotor Externo

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 article discusses the use of an external rotor reluctance machine, operating at high speed (up to 50 krpm), in a Kinetic Energy Storage System (flywheel). The outer rotor acts as a flywheel. This device stores kinetic energy during machine operation as a motor, where it is connected to a DC source. If the primary power supply (DC source) fails, it converts the kinetic energy of the flywheel, allowing the normal operation of a load. Reluctance machine rotation and DC link voltage control techniques are investigated and analyzed through real-time hardware-in-the-loop (HIL) simulations using the Typhoon HIL platform. The choice of how to obtain the angular position occurred after evaluating different techniques present in the literature, having converged to the use of optical sensors. The optimization of commutation angles was applied in the control of operations such as motor and generator. For the purpose of analysis and validation, the results of the HIL are presented, and demonstrate the ability to operate as a generator of the machine, the functioning of the developed system and its applicability.

**Resumo:** Esta artigo aborda o emprego de uma máquina de relutância com rotor externo, operando em alta velocidade (até 50 krpm), em um Sistema Armazenador de Energia Cinética (*flywheel*). O rotor externo desempenha a função de volante de inércia. Este dispositivo armazena a energia cinética durante a operação da máquina como motor, em que fica conectado a uma fonte CC. Havendo a queda da fonte de alimentação primária (fonte CC), converte a energia cinética do volante, permitindo o funcionamento normal de uma carga. São investigadas e analisadas as técnicas de controle de rotação da máquina de relutância e da tensão do elo CC, através de simulações em tempo real com *hardware-in-the-loop* (HIL) usando a plataforma *Typhoon HIL*. A escolha da forma de obtenção da posição angular ocorreu após avaliação de diferentes técnicas presentes na literatura, tendo-se convergido para o uso de sensores ópticos. A otimização dos ângulos de comutação foi aplicada no controle das operações como motor e gerador. Para efeito de análise e validação, os resultados do HIL são apresentados, e demonstram a capacidade de operação como gerador da máquina, o funcionamento do sistema desenvolvido e a sua aplicabilidade.

**Keywords:** Switched Reluctance Machine; High Speed; Kinetic Energy Store; Hardware-in-the-loop; External Rotor.

**Palavras-chaves:** Máquina de relutância chaveada; Alta velocidade; Armazenador de energia cinética; *Hardware-in-the-loop*; Rotor externo.

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário elétrico brasileiro existe grande diversidade de sistemas de geração de energia, como as usinas hidrelétricas, biomassa, solar, eólica, gás natural, nucleares, e também consumidores com características diversificadas (BEN, 2021). Com isto, existe cada vez mais complexidade na operação do sistema elétrico e surgem problemas que afetam a qualidade da energia elétrica fornecida.

A qualidade da energia está relacionada aos tipos de cargas conectadas ao sistema, observando-se equipamentos cujas ligações diretas com as concessionárias são inadequadas

ou requerem elementos intermediários para sua correta conexão. Algumas soluções propõem a inserção de elementos para compor esses dispositivos que possam minimizar as flutuações de curta ou mesmo média durações (Lanes, 2014).

Os componentes eletrônicos utilizados em equipamentos modernos e em sistemas de supervisão e operação automatizados, por suas características intrínsecas, podem prejudicar a qualidade da energia não somente do próprio consumidor que os utiliza, como também a da rede de distribuição e dos demais consumidores a ela ligados. Também alguns equipamentos eletrônicos apresentam grande sensi-

bilidade para problemas da qualidade de energia e estão presentes em áreas sensíveis como a médica ou militar. Desta forma a qualidade de energia tem grande impacto nessas áreas, e vem gerando muita discussão quanto à implicação de uma interrupção do fornecimento da mesma (El-Mann, 2009).

Assim, é extremamente importante conhecer os principais problemas de qualidade de energia e os métodos utilizados para mitigar, ou até mesmo eliminar esses problemas, evitando-se os desperdícios, a necessidade de sobredimensionamento das instalações e o mau funcionamento de equipamentos.

Entre alguns problemas causadores de distúrbios na qualidade de fornecimento da energia elétrica podem-se citar os picos de tensão, afundamentos de tensão, elevações de tensão, variação da frequência da rede, interrupção momentânea e transientes, harmônicos, entre outros. Dentre os problemas apresentados, o afundamento de tensão e a interrupção momentânea e transientes vêm causando grandes prejuízos às indústrias, como perdas de materiais, atraso na produção, danos aos equipamentos elétricos e eletrônicos de grande sensibilidade (Hu et al., 2019).

Segundo a regulamentação da ANEEL (ANEEL, 2017), estabelecida no Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica, do PRODIST, o afundamento temporário de tensão é a situação em que existe a variação de tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência, para valor superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u, com duração superior a 3 s e inferior a 3 minutos. Já a interrupção temporária é quando a tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência é inferior a 0,1 p.u para tempo superior a 3 s e inferior a 3 minutos.

Segundo o artigo Brauner and Hennerbichler (2001), a maioria dos afundamentos de tensão tem uma duração de menos de 500 ms. Após um curto-circuito, a duração do afundamento de tensão depende do sistema de proteção, sendo que para um fusível é de 5 a 10 ms e no disjuntor é de 80 a 150 ms.

Muitas soluções têm sido propostas para resolver estes problemas de qualidade de energia, tais como restaurador dinâmico de tensão (do Inglês, *Dynamic Voltage Restorer* - DVR), tecnologias baseadas em fonte de alimentação ininterrupta (do Inglês, *Uninterruptible Power Supply* - UPS) e geradores a gás ou diesel.

Outra solução para o problema de qualidade de energia é um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC). Comercialmente os SAEC operam em conjunto com geradores a gás ou diesel, e são capazes de alimentar cargas de centenas de kW, ou até MW, por tempos normalmente entre 12 e 60 s (Zanei et al., 2007; Power, 2016). Após este tempo, o gerador passa a suprir a demanda de energia.

Dentro deste contexto, a proposta deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de um SAEC - *flywheel*. O SAEC consiste em um volante de inércia, que acoplado a um sistema de acionamento elétrico é capaz de converter a energia mecânica em energia elétrica e vice-versa (Amiryar and Pullen, 2017).

O SAEC normalmente utiliza um volante de inércia, com momento de inércia  $J$ , girando a uma velocidade angular

$\omega$ , armazenando a energia cinética  $E_c$  dada pela expressão (Oliveira, 2011):

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (1)$$

Neste trabalho é empregada a máquina de relutância chaveada (SRM), Figura 1, operando em alta velocidade (50 krpm), em SAEC. Os parâmetros da SRM são apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A. Para ter um projeto mecânico mais compacto e robusto, optou-se em Bernsmüller (2016) por um rotor externo, que desempenha de forma integrada a função de volante de inércia. A justificativa da proposta baseia-se na equação (1). Com o rotor externo, o momento de inércia pode ser maior, aumentando a energia armazenada.

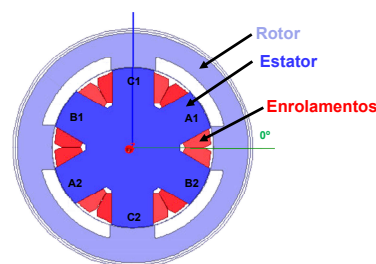


Figura 1. Seção transversal da SRM 6/4 utilizada.

## 2. SISTEMA PROPOSTO

Neste trabalho, o SAEC 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. 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 *flywheel*** – neste modo de operação a máquina funciona como gerador, e transforma a energia cinética armazenada no volante em energia elétrica.

A configuração do SAEC utilizada é mostrada na Figura 2, com a carga crítica no barramento CC e o conversor ponte assimétrica (AHB).

Na configuração do conversor adotada, os pares de polos de um mesmo eixo do estator da SRM são alimentados por um único módulo da Figura 3, requerendo um total de 3 módulos para a SRM 6/4.

## 3. MODELAGEM DA SRM

A tensão instantânea ( $v_s$ ) nos terminais do enrolamento da SRM está relacionada com o fluxo enlaçado ( $\Phi$ ) pela lei de Faraday como:

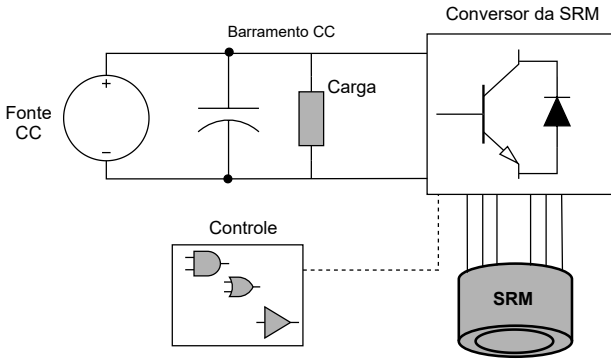


Figura 2. SAEC com carga no barramento CC.

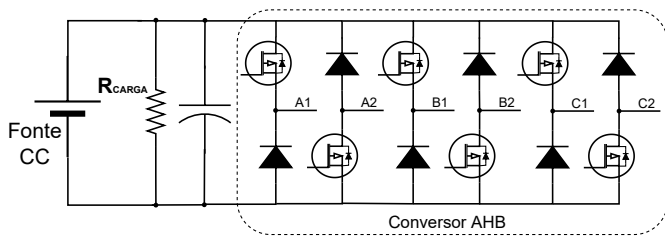


Figura 3. Conexão do conversor AHB utilizada.

$$v_s = r_s \cdot i + \frac{d\Phi(\theta, i)}{dt}, \quad (2)$$

onde  $r_s$  é a resistência do enrolamento e  $i$  é a corrente do enrolamento de fase.

Para o cálculo de estimação do fluxo enlaçado pode-se utilizar a expressão:

$$\Phi = \int (v_s - r_s \cdot i) dt \quad (3)$$

As correntes do estator são dadas pela função não linear  $i(\Phi, \theta)$ , que pode ser calculada a partir da curva de magnetização  $\Phi(i, \theta)$ .

Outra curva importante é a curva de torque eletromagnético ( $T_e(\theta, i)$ ), obtida a partir da equação (4).

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (4)$$

A partir do equacionamento matemático e das curvas não lineares, o modelo não linear em diagrama de blocos da SRM é mostrado na Figura 4, considerando as funções  $i(\Phi, \theta)$  e  $T_e(\theta, i)$  (Lanes, 2014).

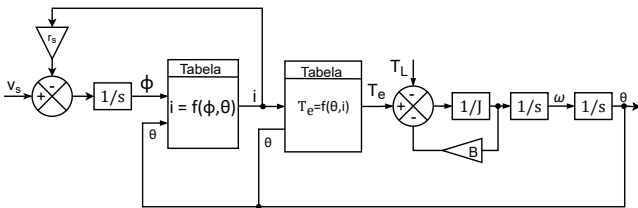


Figura 4. Modelagem da SRM.

Na Figura 4,  $T_L$  é o torque de carga,  $\omega$  é a velocidade angular,  $B$  é o atrito viscoso e  $J$  é o momento de inércia.

A Figura 5 apresenta as curvas de corrente nos enrolamentos  $i(\Phi, \theta)$  obtidas via métodos de elementos finitos.

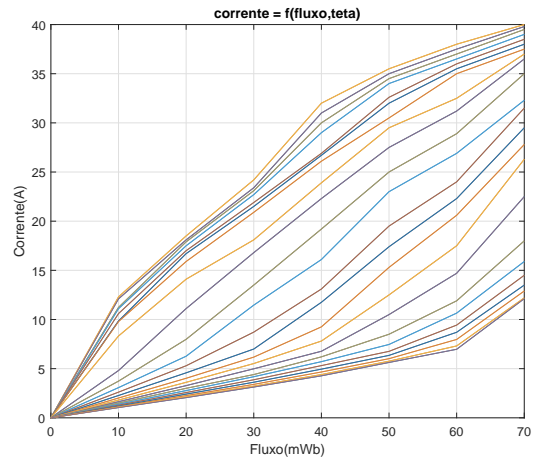


Figura 5. Curvas  $i(\Phi, \theta)$ .

O torque eletromagnético ( $T_e(\theta, i)$ ) é uma função não linear da corrente do estator e da posição do rotor, e as curvas para uma das fases são apresentadas na Figura 6. Podem ser observados valores de torque negativo para ângulos entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$ , o que representa SRM operando como gerador, e valores de torque positivo para ângulos entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , correspondendo à SRM funcionando como motor.

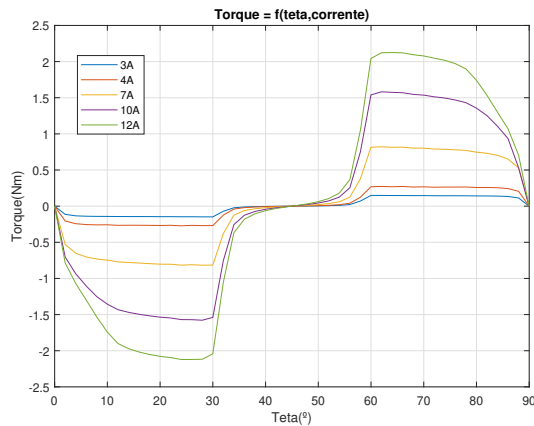


Figura 6. Curva  $T_e(\theta, i)$ .

#### 4. SISTEMA DE CONTROLE

O controle do conversor AHB depende do modo de operação da SRM, isto é, motor ou gerador.

Existem diferentes maneiras de controlar uma SRM. As variáveis da SRM mais comumente controladas são a velocidade, a corrente e o torque. Para este trabalho, o objetivo principal é o controle da velocidade e da corrente.

A Figura 7 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 dependente do modo da operação da SRM.

Considerando a *lógica de comutação* da Figura 7, cada fase da SRM é comutada (energizada) a partir da res-

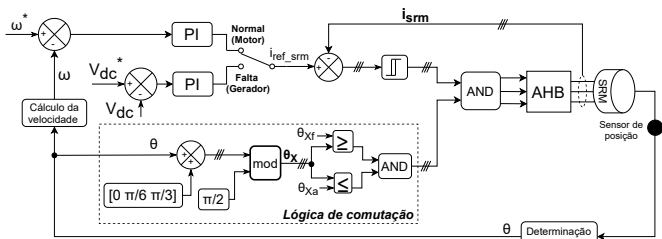


Figura 7. Diagrama de blocos do controle da SRM.

pectiva variável  $\theta_X$  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  $0^\circ$  e  $30^\circ$ . Já para ângulos entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , 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. Durante a operação motora (normal), a corrente de referência ( $i_{ref\_srm}$ ) é obtida via controle da velocidade. Através da realimentação da corrente são obtidos os erros de cada fase. Os sinais dos erros passam por comparadores, dos quais os sinais de chaveamento para o conversor AHB são obtidos, pela operação booleana *AND* entre esses sinais da saída do controlador de corrente e as saídas da *lógica de comutação*. Durante a operação geradora (falta), a corrente de referência é obtida via controle da tensão do elo CC.

A determinação da posição absoluta  $\theta$  e o cálculo da velocidade  $\omega$  são obtidos via sensores ópticos.

Os sensores ópticos são usados em muitos trabalhos na literatura como alternativa para a obtenção da posição rotórica da SRM (Gong et al., 2019; Ma et al., 2012). Os sensores ópticos de alta resolução são normalmente caros, por isso, são geralmente utilizados sensores de baixa resolução, sendo facilmente encontrados e a custo acessível.

Para que seja possível variar os ângulos da SRM, para controlar a máquina e maximizar sua eficiência, é necessário determinar a posição angular instantânea com alta resolução. Para isso, é fundamental o uso de métodos de estimação e/ou interpolação a partir dos sinais de baixa resolução.

Um dos métodos de estimação muito utilizado na literatura para a obtenção da posição é a *Phase-Locked Loop* (PLL) (Zhao et al., 2016).

Na seção posterior é apresentada mais detalhes sobre os sensores ópticos utilizados.

### 5. SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

Para o projeto, implementação e teste de sistemas de controle, cada vez mais a simulação *hardware-in-the-loop* (HIL) é necessária, onde partes dos componentes da malha de controle são *hardware* real e partes são simuladas.

No âmbito dos sistemas elétricos, um sistema HIL é uma bancada híbrida real/digital em que uma parte do sistema elétrico é modelada e simulada em tempo real, enquanto a outra parte consiste em equipamento real de *hardware* que realiza interação com a simulação em tempo real através de interfaces de conexão tais como canais digitais,

canais analógicos, equipamentos de condicionamento de sinais, etc. Assim, a simulação digital em tempo real utilizada nessas situações necessita da disposição de canais de entrada e saída que permitam as trocas de informações com componentes externos (Rueda, 2019).

A Figura 8 apresenta o esquemático das conexões do sistema de controle do SAEC com sistema HIL e o controlador embarcado. Neste trabalho utiliza-se o dispositivo HIL402 (Typhoon HIL) como simulador em tempo real. Já o sistema de controle embarcado utilizado é o DSP (*Digital signal processor*) da Texas Instruments, Delfino F28379D controlCARD (TMDSCNCD28379D).

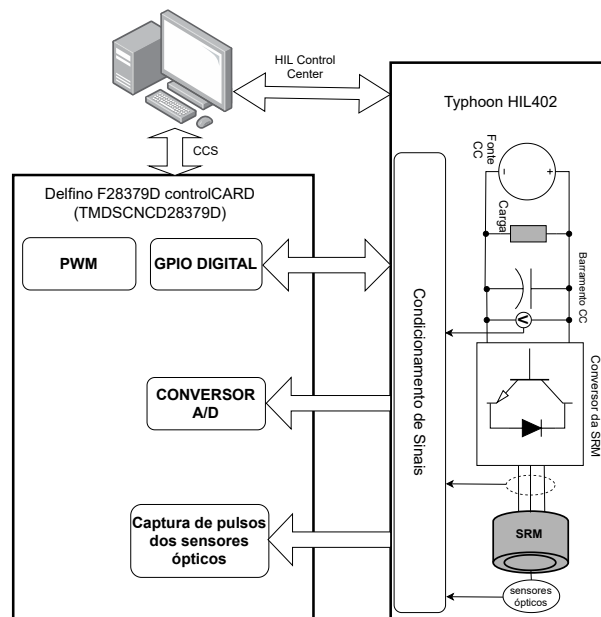


Figura 8. Esquemático do sistema de controle de SAEC.

O sensor óptico utilizado para a leitura da posição da SRM é o PHCT203, que é um diodo emissor de luz infravermelho de arsenieto de gálio acoplado a um fototransistor de silício em uma caixa de plástico. A Figura 9 ilustra o posicionamento dos sensores, que são fixos e defasados de  $120^\circ$ , e um disco acoplado ao rotor. Esse disco é composto por 4 janelas com abertura de  $30^\circ$ , cada uma seguida de uma janela fechada de  $60^\circ$ .

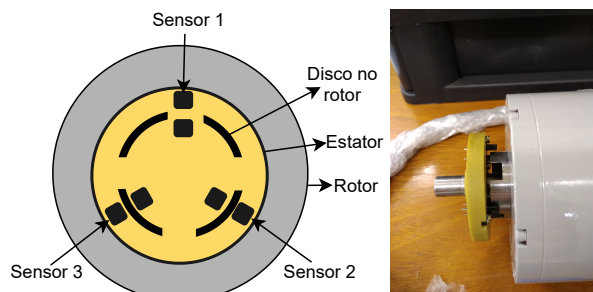


Figura 9. Sensor de posição do protótipo da SRM.

Da Figura 8, um computador pessoal é usado com os softwares *Code Composer Studio* (CCS) e *HIL Control Center*, conectado ao DSP F28379D e Typhoon HIL através de cabos USB. Podem também ser usados dois computadores, um para cada dispositivo. O computador com

CCS envia o código para a placa controladora e faz o monitoramento das variáveis internas do controlador. A placa controladora realiza as leituras das grandezas analógicas, envia e recebe as grandezas digitais e realiza a captura dos pulsos dos sensores ópticos. Neste trabalho, embora não seja utilizada a modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) para controlar as correntes, o *timer* do módulo ePWM (*Enhanced Pulse Width Modulator*) é utilizado para sincronizar os instantes de amostragem e a execução dos algoritmos de controle, mediante interrupções.

O procedimento de operação do DSP começa com a inicialização de *hardware*, onde o processador primeiro reseta e então inicializa os periféricos a serem usados como registradores e *timers*. Após, é inicializado o *software* e as configurações são carregadas na memória RAM. O *software* entra em um laço depois que as inicializações são feitas e espera por sinais de disparo para as interrupções.

O fluxograma da inicialização pode ser visto na Figura 10.

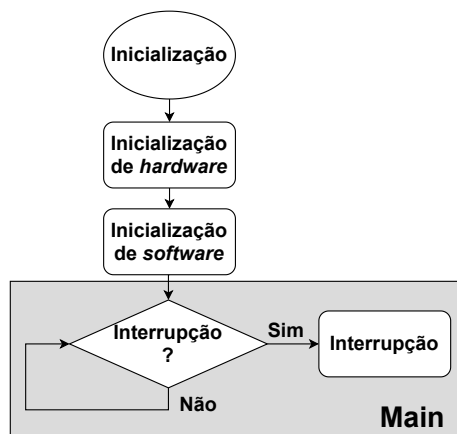


Figura 10. Fluxograma da inicialização da placa controladora.

A estrutura do sistema de controle no DSP é composta por 4 interrupções, sendo 3 dos módulos eCAP (*Enhanced Capture*) e um do módulo ADC (*Analog to Digital Converter*).

As interrupções eCAP1 Interrupt(), eCAP2 Interrupt() e eCAP3 Interrupt() são utilizadas para realizar as leituras das saídas dos sensores ópticos. Cada módulo realiza a detecção das bordas de subida e descida. A diferença entre os tempos de subida e descida determina o tempo entre as bordas (*temp\_diff*), como ilustra a Figura 11.

A velocidade da máquina é calculada de acordo com a equação (5). A variável *temp\_diff* representa o número de pulsos de *clock* (contagens) entre as bordas,  $200 \cdot 10^6$  é a frequência de operação do DSP, 12 é número de vezes que o sensor óptico encontra-se em nível alto em um ciclo de  $360^\circ$  e 60 é usado para fazer a conversão para rotações por minuto (rpm).

$$Velocidade(rpm) = \frac{200 \cdot 10^6}{temp\_diff} * \frac{60}{12} \quad (5)$$

Os intervalos angulares entre as transições dos sinais dos sensores são grandes (da ordem de  $30^\circ$ ). Essa resolução é baixa demais para a determinação da posição do rotor

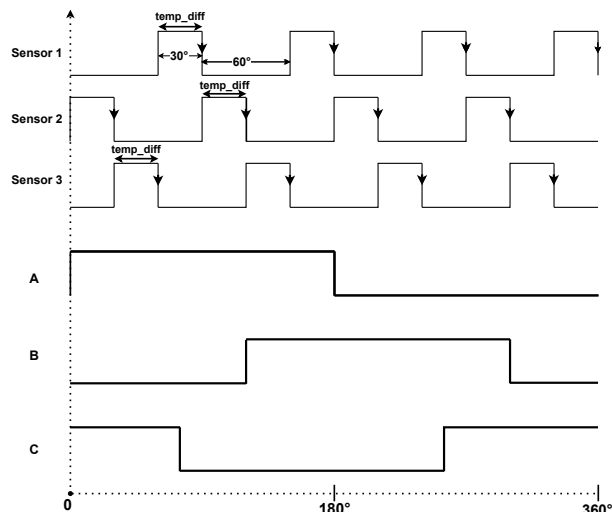


Figura 11. Sinais obtidos via sinais dos sensores ópticos.

e realização dos avanços nos ângulos de comutação. Para superar essas limitações e poder medir a posição angular do rotor com boa resolução, é proposta a sua estimação utilizando um PLL trifásico. Para a correta estimação da posição, as entradas do PLL são três sinais defasados de  $120^\circ$  entre si, analogamente ao sistema trifásico de uma rede elétrica. Esses sinais defasados são obtidos a partir dos sinais dos sensores ópticos usando uma função de contador de bordas de descida, como mostra a Figura 11.

As curvas mostradas na Figura 11 (A, B e C) variam entre 0 (estado desligado) e 1 (estado ligado). As entradas do PLL (HA, HB e HC) devem ser simétricas (variar entre -1 e 1), sendo 1 para o estado ligado e -1 para o estado desligado, e são obtidas a partir de A, B e C.

Para a estimação da posição é utilizado o SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame-Phase Locked Loop*). Para melhorar o resultado do PLL é usado filtro passa-baixa (LP) após a transformação *abc - dq*. Também esse PLL pode estimar a velocidade, usando o filtro passa-baixa de segunda ordem para filtrar esse sinal. Entretanto, para este trabalho utiliza-se a velocidade obtida a partir dos módulos eCAP. A Figura 12 ilustra o SRF-PLL utilizado.

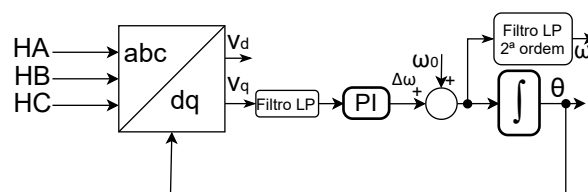


Figura 12. SRF - PLL para a estimação da posição.

Após a obtenção da posição e os avanços dos ângulos de comutação, é possível realizar o controle do SAEC. O controle é realizado na interrupção ADC Interrupt(), disparado com uma frequência de 50 kHz.

Inicialmente é realizada a aquisição das principais variáveis para o controle do SAEC, as correntes das três fases da SRM e a tensão do barramento CC. Essas variáveis sofrem as reduções em suas amplitudes compatíveis com o nível de sinal de entrada exigido pelo ADC do DSP.

O controle da velocidade da SRM, da tensão do barramento CC e das correntes da SRM é realizado na interrupção, com as leituras analógicas sincronizadas com o PWM.

As etapas de sistema de controle são apresentadas no fluxograma da Figura 13.

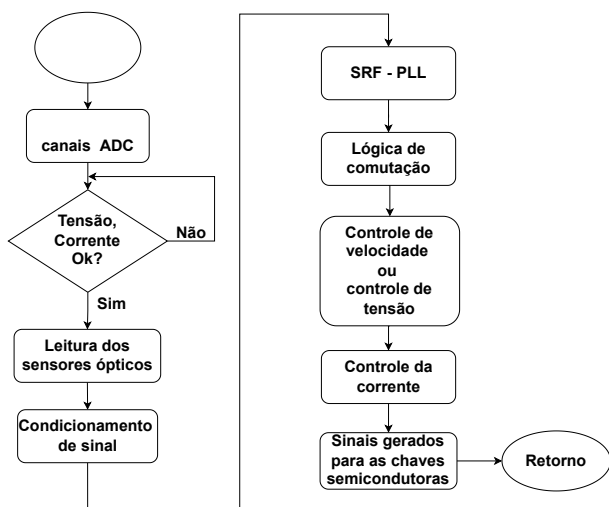


Figura 13. Fluxograma do controle do SAEC.

## 6. RESULTADOS

A bancada HIL do SAEC para a obtenção dos resultados é apresentada na Figura 14.

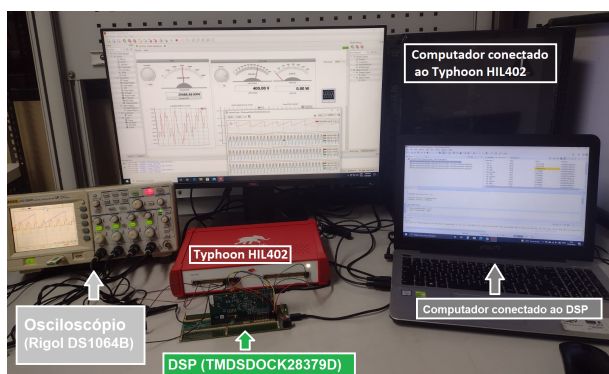


Figura 14. Bancada HIL para a obtenção dos resultados.

São usados dois computadores, um conectado ao Typhoon HIL402 e outro conectado ao DSP através de cabos USB. Os resultados provenientes das saídas analógicas do Typhoon HIL são coletados no osciloscópio.

Inicialmente foram realizados testes para a validação do algoritmo do PLL implementado no DSP. A posição estimada pelo DSP foi comparada com a posição dada pela saída do modelo da SRM no Typhoon HIL. A Figura 15 apresenta a posição estimada pelo PLL (CH1 - azul) e a posição dada pelo modelo no Typhoon HIL (CH2 - vermelho).

A posição estimada apresenta uma pequena defasagem em relação à posição do modelo, resultado da limitação do PLL.

Para a obtenção dos resultados do SAEC foram adotados os seguintes critérios considerando o modo de operação

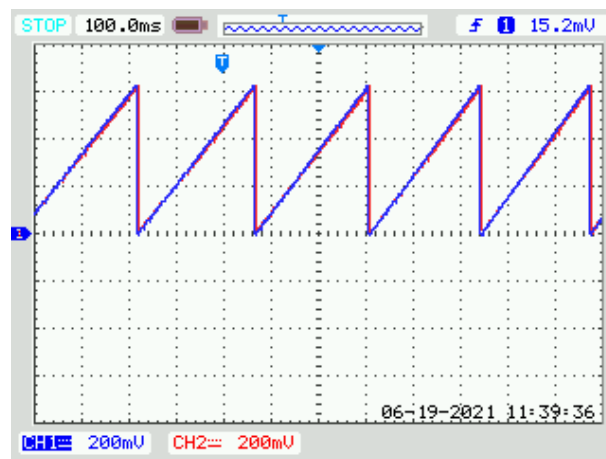


Figura 15. Curvas de posição estimada vs posição dada pelo modelo da SRM.

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 barramento CC de 1 kW. A velocidade da SRM diminui até 20 krpm, quando a SRM volta a funcionar como motor aumentando a velocidade até 50 krpm.

Quando a SRM funciona como motor, os resultados são coletados para diferentes velocidades, visto que esse parâmetro influencia nas características das curvas da máquina.

A Figura 16 apresenta as curvas de posição (CH1 - azul), corrente (CH2 - vermelho), torque (CH3 - verde) e comutação de fase (CH4 - laranja) da SRM para velocidade próxima de 5000 rpm.

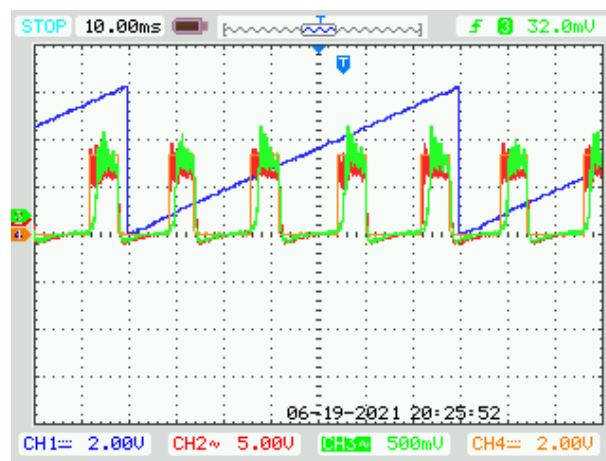


Figura 16. Curvas obtidas para velocidade próxima de 5000 rpm.

As Figuras 17 e 18 apresentam as curvas da SRM para velocidades mais elevadas próximas de 35 krpm e 50 krpm, respectivamente.

Os resultados apresentados em volts (V) representam as mesmas amplitudes das grandezas provenientes do Typhoon HIL: posição em radianos (rad), corrente em ampère (A) e torque em newton-metro (N.m).

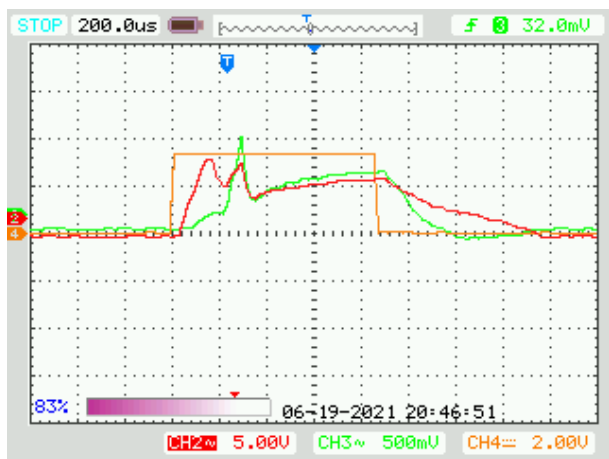


Figura 17. Curvas obtidas para velocidade próxima de 35 krpm.

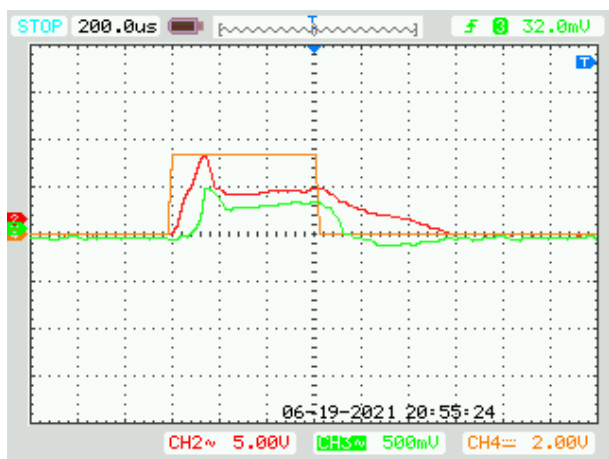


Figura 18. Curvas obtidas para velocidade próxima de 50 krpm.

Para o monitoramento da velocidade, tensão do barramento CC, potência da carga e as curvas de resposta, foi criada a interface homem-máquina (IHM) que monitora as grandezas em tempo real. A IHM da máquina quando a SRM se encontra na velocidade de referência é mostrada na Figura 19.

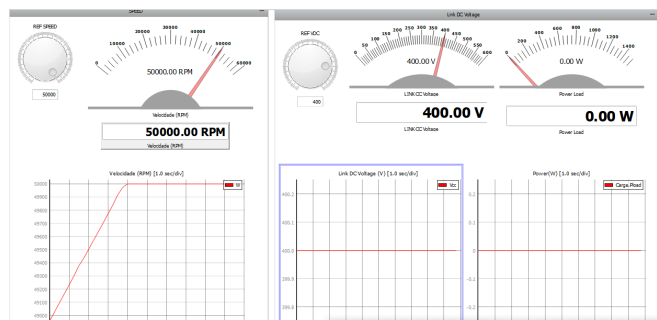


Figura 19. IHM quando SRM atinge a velocidade de referência.

Quando a SRM alcança a velocidade de referência de 50 krpm, esta é acionada como gerador e as suas curvas para a corrente ( $\times 0,5$ ) (CH2 - vermelho), torque (CH3 - verde)

e comutação de fase (CH4 - laranja) são apresentadas na Figura 20.

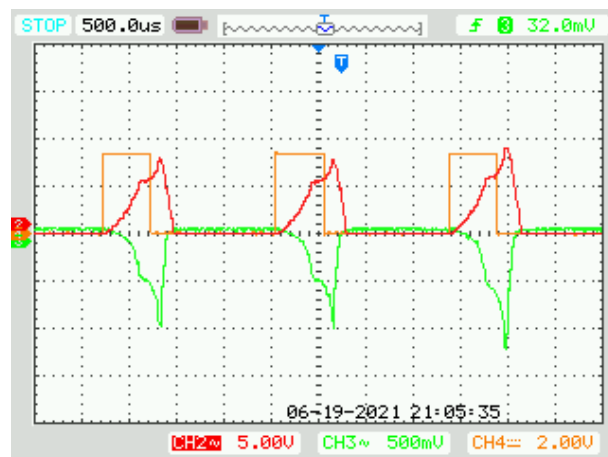


Figura 20. Curvas obtidas para SRM como gerador

A IHM da máquina quando a SRM inicia a operação como gerador é mostrada na Figura 21. Nesse instante, a SRM alimenta uma carga de 1 KW e a tensão do barramento CC é controlada através do conversor da máquina para a referência de 400 V. A máquina alimenta a carga até atingir a velocidade de 20 krpm, quando neste instante volta a funcionar como motor.

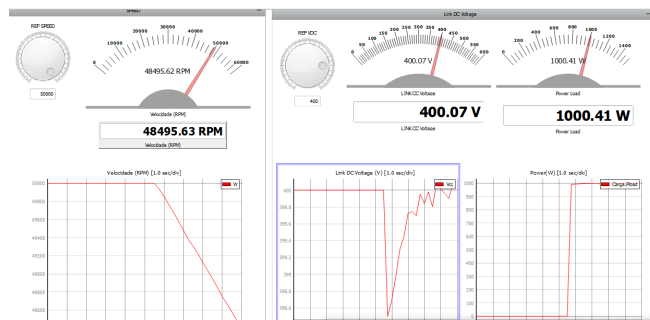


Figura 21. Interface homem-máquina na operação da SRM como gerador.

A Figura 22 apresenta a IHM quando a SRM muda do modo gerador para motor. Neste instante, pode ser observado que a potência na carga volta a ser zero e a tensão do barramento CC é a proveniente da fonte CC.

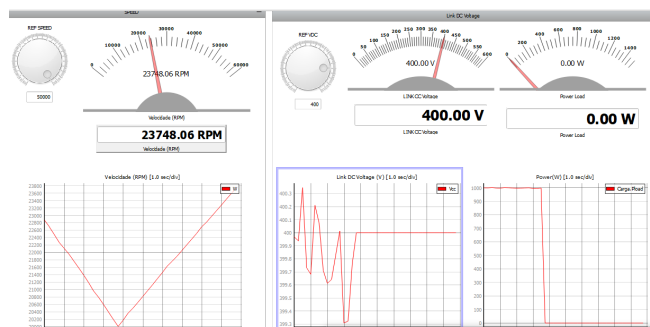


Figura 22. Interface homem-máquina na mudança modo de operação de gerador para motor.

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a implementação do controle digital da máquina de relutância chaveada (SRM) operando em alta velocidade, visando sua aplicação como SAEC (*flywheel*).

Os resultados mostraram um excelente funcionamento do SAEC usando o PLL para a estimação de posição e realizando os avanços na comutação das fases da SRM.

Durante o funcionamento do SAEC no ambiente HIL, foram coletados os resultados para diferentes velocidades da máquina. Os resultados foram apresentados através das curvas de posição, de corrente, do torque e da comutação de fase, quando a SRM funciona como motor e como gerador. As curvas de velocidade, de tensão do barramento CC e da potência na carga foram apresentadas. A velocidade da SRM acompanha a referência desejada. É visto também que as curvas de torque são positivas para operação motora e negativa para operação geradora. As correntes das fases da máquina atingiram valores próximos de 7A na operação motora. Na operação geradora, as correntes atingiram valores próximos de 12A.

A partir dos resultados e discussões conclui-se que a SRM mostra-se uma opção viável para operar num SAEC, visto que apresentou bons resultados da simulação em tempo real para a operação em alta velocidade com ótima capacidade de geração. Também foi satisfatório o desempenho dos algoritmos de controle implementados no microcontrolador Delfino F28379D, com o sensoriamento da posição angular do rotor feito por sensores de baixa resolução.

## 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

(2021). *EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN): Ano base 2020*. URL <https://www.epe.gov.br>.

Amiryar, M.E. and Pullen, K.R. (2017). A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*, 7(3). doi:10.3390/app7030286.

ANEEL (2017). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*.

Bernsmüller, E. (2016). *Máquina de Relutância com Rotor Eterno para Sistema Armazenador de Energia Cinética*. Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Brauner, G. and Hennerbichler, C. (2001). Voltage dips and sensitivity of consumers in low voltage networks. In *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482)*, volume Summaries, 142–142. doi:10.1049/cp:20010760.

El-Mann, M. (2009). *Sistema armazenador de energia cinética – SAEC: implementação experimental*. Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Gong, C., Li, S., Habetler, T., Restrepo, J., and Soderholm, B. (2019). Direct position control for ultrahigh-speed switched-reluctance machines based on low-cost nonintrusive reflective sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 480–489. doi:10.1109/TIA.2018.2868037.

Hu, A., Zhuang, J., Tao, Y., Yang, J., and Zhou, C. (2019). A voltage sag suppression method with short response time based on energy storage system. In *2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 1854–1859. doi:10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019634.

Lanes, M.M. (2014). *Análise e Avaliação Experimental de Requisitos para Controle Digital do Acionamento de um Armazenador Cinético (flywheel) de Alta Velocidade com Máquina de Relutância Chaveada*. Tese de doutorado., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Ma, Q., Bi, D., and Ge, B. (2012). Digital control issue of high speed switched reluctance motor. In *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 641–646. doi:10.1109/ISIE.2012.6237164.

Oliveira, J.G.d. (2011). *Power Control Systems in a Flywheel based All-Electric Driveline*. Ph.D. thesis, Uppsala University, Electricity, Sweden.

Power, A. (2016). *User manual - CleanSource 275XT UPS*. URL <https://manualzz.com/doc/40427388/cleansource%275xt-ups>.

Rueda, O.A.S. (2019). *Simulador em tempo real baseado na integração de módulo FPGA e CPUs para avaliação de controladores embarcados de conversores eletrônicos de potência*. Tese de doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Zanei, G., Cevenini, E., Ruff, H., and Ulibas, O. (2007). Integrated systems for ups: New solutions in the power quality chain. In *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference*, 582–586. doi:10.1109/INTLEC.2007.4448847.

Zhao, Y., Huang, W., Yang, J., Bu, F., and Liu, S. (2016). A pmsm rotor position estimation with low-cost hall-effect sensors using improved pll. In *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 804–807. doi:10.1109/ITEC-AP.2016.7513058.

## 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)               | $3,05 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ |
| Número de polos do estator           | 6                                   |
| Número de polos do rotor             | 4                                   |
| Potência                             | 1 kW                                |