

# MELHORIA DE DESEMPENHO DE MOTORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL VIA ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS

Filipe P. Scalcon<sup>1</sup>, Thieli S. Gabbi<sup>2</sup>, Rodrigo P. Vieira<sup>1</sup> e Hilton A. Gründling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Brasil

e-mail: filipescalcon1@gmail.com

**Resumo** – Este trabalho apresenta como contribuição um procedimento para otimização dos ângulos de disparo de um motor de relutância variável via algoritmo de enxame de partículas. Com isso, objetiva-se garantir um desempenho com equilíbrio entre reduzida ondulação de torque e elevada eficiência energética. A técnica é destinada a motores de relutância variável operando na região de controle de corrente, abaixo da velocidade base. O procedimento proposto é comparado com uma abordagem tradicional, de varredura de parâmetros, a fim de mostrar a significativa diminuição do esforço computacional. Resultados de simulação e experimentais são apresentados, mostrando que um balanço entre eficiência e ondulações de torque é alcançado.

**Palavras-chave** – Ângulos de disparo; Eficiência energética; Motor de relutância variável; Ondulação de torque; Otimização por exame de partículas.

## PERFORMANCE IMPROVEMENT OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS VIA PARTICLE SWARM ALGORITHM

**Abstract** – This paper presents as a contribution a procedure to optimize the firing angles of a switched reluctance motor via the particle swarm optimization algorithm. This aims to ensure performance with a balance between reduced torque ripple and high energy efficiency. The technique is intended for SRMs operating in the current controlled region, below the base speed. The proposed procedure is compared with a traditional parameter sweeping approach in order to show the significant decrease in the computational effort. Simulation and experimental results are presented, showing that a performance with a balance between efficiency and torque ripple is achieved.

**Keywords** – Energy efficiency; Firing angles; Particle swarm optimization; Switched reluctance motor; Torque ripple.

## I. INTRODUÇÃO

A máquina de relutância variável despertou o interesse de vários pesquisadores nos últimos anos, principalmente por

apresentar características que a tornam uma forte concorrente a outras máquinas elétricas estabelecidas no mercado. Dentre suas características destaca-se uma estrutura simples, composta por dupla saliência e enrolamentos concentrados montados nas ranhuras do estator [1]. A produção de torque em um motor de relutância variável (do inglês, *Switched Reluctance Motor* - SRM) ocorre devido à estrutura de dupla saliência da máquina e ao campo magnético produzido pelas bobinas do estator, chamado de torque de relutância. Isso faz com que a máquina não dependa de ímãs ou correntes induzidas para excitação rotórica, configurando uma grande vantagem quando comparada a máquinas de indução e de ímãs permanentes, por exemplo. Somando-se a isso, o SRM apresenta baixos custos de fabricação e um processo de produção simplificado [1]–[5].

Devido à estrutura de dupla saliência e a natureza comutada, a máquina apresenta ondulações de torque significativamente maiores quando comparada a outras máquinas elétricas. Este efeito é indesejado, uma vez que é responsável pela produção de ruído acústico e vibrações mecânicas, capazes de diminuir a vida útil da máquina [6], [7]. Somando-se a isso, efeitos de saturação magnética e indutâncias de fase dependentes da posição rotórica tornam o comportamento dinâmico altamente não-linear e a análise matemática de grande complexidade [8]–[10].

Para um SRM com requisitos de operação em velocidade variável, características como baixa ondulação de torque e elevada eficiência energética são fatores de interesse. Durante a operação, o intervalo no qual ocorre a excitação de fase, definido pelos ângulos de disparo,  $\theta_{on}$  e  $\theta_{off}$ , afeta de forma significativa o desempenho do motor. A escolha adequada destes ângulos pode levar a uma redução na ondulação de torque ou melhoria de eficiência. Devido a falta de uma formulação analítica simples para a escolha destes parâmetros, nos últimos anos, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de melhorar o desempenho da máquina através da otimização dos ângulos de disparo [11]–[19].

Nos trabalhos [12] e [13], extensas análises a respeito do impacto dos ângulos de disparo no desempenho de um SRM operando abaixo e acima da velocidade base são apresentadas, respectivamente. Em ambos os trabalhos, a comutação dos ângulos é feita *on-line*, por controladores que não exigem as características de magnetização das máquinas. Resultados experimentais mostram que as técnicas propostas melhoram o desempenho geral do motor, apresentando equilíbrio entre a oscilação de torque e a eficiência energética. As propostas são unificadas em [14], onde uma estratégia para toda a faixa de operação é discutida.

Uma otimização de desempenho para geradores de

Manuscript received 07/05/2020; first revision 10/01/2020; accepted for publication 11/10/2020, by recommendation of Editor Demercil de Souza Oliveira Jr. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2020.4.0038>

relutância variável (GRV), operando abaixo da velocidade base, através do balanço entre ondulação de torque e eficiência é proposta em [15]. Uma otimização multiobjetivo de desempenho baseada no planejamento de experimentos computacionais aplicada a GRVs é descrita em [16]. Os ângulos de disparo ótimos são determinados para toda a faixa de operação, abaixo e acima da velocidade base, fazendo uso de funções custo contendo ondulação de torque, corrente RMS e valor máximo de fluxo. Duas estratégias diferentes de preenchimento de espaço são comparadas, sendo que uma delas, *latin hypercube*, reduz de forma significativa o esforço computacional do procedimento. Os parâmetros ótimos são implementados em função da velocidade de operação, com resultados experimentais para operação em baixas e altas velocidades comprovando um desempenho com equilíbrio entre a oscilação do torque e a eficiência do sistema. A análise, no entanto, não foi estendida para motores.

Uma alternativa para problemas com difícil formulação analítica é o uso de algoritmos inteligentes, como o algoritmo de otimização por enxame de partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization* - PSO) [20],[21]. Na literatura verifica-se utilização do PSO aplicado a otimização de projeto de SRMs, como [22], [23]. Observa-se, entretanto, que a otimização de desempenho de SRMs usando o algoritmo PSO não é abordada, e que existe margem para contribuições neste tema.

Este trabalho tem como contribuição um procedimento de obtenção dos ângulos de disparo ótimos para um SRM baseado no algoritmo de otimização por enxame de partículas. Uma nova função custo é elaborada a fim de garantir um desempenho com equilíbrio entre reduzida ondulação de torque e elevada eficiência energética. A fim de evitar o uso de tabelas de busca na implementação, o efeito da variação de carga mecânica é desconsiderado. O procedimento se destina a SRMs operando na região de controle de corrente, abaixo da velocidade base. Uma abordagem tradicional de varredura de parâmetros é apresentada e, em seguida, a alternativa é proposta, fazendo uso do algoritmo PSO. Resultados de simulação são apresentados, comparando os resultados de cada técnica, e evidenciando o reduzido esforço computacional da técnica proposta. Após a obtenção dos ângulos ótimos, um ajuste por regressão linear é realizado a fim de garantir simplificada implementação digital. Resultados experimentais para toda a faixa de operação são apresentados, permitindo observar-se que um balanço entre eficiência e ondulações de torque é alcançado.

## II. DESEMPENHO DO MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O motor de relutância variável é uma máquina de excitação exclusivamente estática. A produção de torque ocorre pela tendência natural do rotor de buscar alinhamento com o enrolamento que está sendo excitado, maximizando a indutância do circuito. O torque instantâneo de um SRM é dado pela variação da co-energia [24], como visto em (1).

$$T = \frac{\partial W^{co}}{\partial \theta}. \quad (1)$$

A co-energia total,  $W^{co}$ , é dada pela soma da co-energia de cada fase,

$$W^{co} = \sum_{j=1}^3 w_j^{co}(\theta, i), \quad 1 \leq j \leq 3, \quad (2)$$

em que a co-energia de uma dada fase é dada por,

$$w_j^{co} = \int_0^i \phi(\theta, i) di, \quad (3)$$

onde  $\phi$  é o fluxo concatenado,  $i$  é a corrente de fase e  $\theta$  é a posição rotórica.

A tensão em uma fase do SRM é dada por,

$$v = Ri + \frac{d\phi(\theta, i)}{dt}. \quad (4)$$

onde  $R$  é a resistência do enrolamento. Expandindo o termo  $\frac{d\phi(\theta, i)}{dt}$ , pode-se reescrever (4) como,

$$v = Ri + l(\theta, i) \frac{di}{dt} + e_b. \quad (5)$$

onde  $l(\theta, i)$  representa o termo de indutância incremental e  $e_b$  é a força contra-eletromotriz [24].

Considerando o perfil de indutância não-linear, típico em SRMs, verifica-se que o intervalo de excitação, definido por  $\theta_{on}$  e  $\theta_{off}$ , afeta de forma considerável o desempenho do SRM, alterando as características de conjugado e perdas da máquina. Máxima eficiência e mínima ondulação de torque são critérios que não podem ser satisfeitos de forma simultânea, na maioria das situações [12]. Assim, pode-se otimizar o desempenho de SRMs através do compromisso entre ondulações de torque e eficiência.

Dado o comportamento altamente não-linear do SRM, o uso de uma formulação analítica para busca de ângulos de disparo ótimos torna-se uma tarefa complexa [12], [16]. Assim, é de interesse a utilização de algoritmos de otimização na busca por ângulos de disparo ótimos.

Uma estratégia bastante utilizada na literatura é a varredura de parâmetros, como visto em [11] e [19], por exemplo. A técnica apresenta simplicidade de implementação e garante que uma solução ótima sempre será encontrada, no entanto, sofre de problemas como o elevado número de avaliações da função custo. Somando-se a isso, com a ampliação do espaço de busca, o problema cresce exponencialmente, inviabilizando a estratégia em certas situações. Um exemplo da técnica pode ser visto na Figura 1.a, onde a totalidade do espaço de busca é avaliada, em pontos igualmente espaçados. Note que as variáveis X e Y são arbitrárias, usadas apenas para ilustrar o comportamento dos algoritmos de otimização.

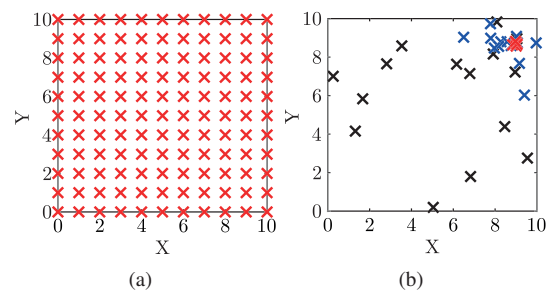


Fig. 1. Exemplos de algoritmos de otimização. (a) Varredura de parâmetros. (b) Enxame de partículas.

Como alternativa, pode-se optar pelo uso de outros algoritmos de otimização, buscando-se uma redução de custo computacional. Dentre eles, destaca-se o algoritmo de otimização por enxame de partículas [25]. O PSO é uma meta-heurística inspirada na inteligência de grupos observados na natureza, como cardumes de peixes.

Inicialmente, um grupo de  $N$  partículas é aleatoriamente posicionado no espaço de busca e avalia-se a função custo para todas as respectivas posições. A posição de cada partícula,  $s_x(k)$ , é atualizada ao longo das  $M$  épocas com base nas seguintes equações,

$$s_x(k+1) = s_x(k) + v_x(k+1), \quad x = 1 \dots N, \quad k = 1 \dots M. \quad (6)$$

$$v_x(k+1) = \lambda v_x(k) + \psi_1 r_1 (P_{x.best} - s_x(k)) + \psi_2 r_2 (G_{best} - s_x(k)). \quad (7)$$

onde a velocidade de cada partícula,  $v_x$ , é calculada com base no melhor ponto avaliado pela partícula ( $P_{x.best}$ ) e no melhor ponto avaliado pelo enxame ( $G_{best}$ ). O subíndice  $x$  refere-se ao número da partícula, enquanto o valor de  $k$  indica a época em questão. Os parâmetros  $\psi_1$  e  $\psi_2$  correspondem aos coeficientes cognitivo e social, respectivamente. Os termos  $r_1$  e  $r_2$  retornam um valor aleatório entre 0 e 1 e  $\lambda$  corresponde ao coeficiente de inércia, usado para desacelerar o enxame ao longo das épocas [26].

Assim, no algoritmo PSO, cada partícula se movimenta com base no conhecimento individual e do grupo, em busca de uma solução ótima para o problema. O comportamento do algoritmo pode ser observado na Figura 1.b, onde verifica-se que com o passar das épocas as partículas movimentam-se, eventualmente convergindo para a solução.

### III. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO DOS ÂNGULOS DE DISPARO DO SRM

Para operação como motor, abaixo da velocidade base, os ângulos de disparo do SRM devem ser ajustados para cada valor de velocidade, a fim de otimizar o desempenho da máquina. Assim, os algoritmos propostos a seguir determinam os ângulos ótimos de operação do SRM com base em simulações dinâmicas.

Inicialmente, construiu-se um modelo de simulação do SRM no *software* Matlab/Simulink, conforme descrito em [24], [27]. O modelo faz uso de tabelas de busca, que contém características eletromagnéticas da máquina obtidas experimentalmente, e de um conversor estático meia-ponte assimétrica (do inglês, *Assymetric half-bridge* - AHB), necessário para operação como motor. A topologia do conversor AHB trifásico utilizado é apresentada na Figura 2. A máquina utilizada neste trabalho possui as seguintes características: configuração 12/8 trifásica, 2 kW, velocidade nominal de 157 rad/s e velocidade base de 110 rad/s.

A estrutura de controle utilizada é apresentada no diagrama de blocos da Figura 3. Um controlador de velocidade robusto, projetado por meio de desigualdades matriciais lineares, é responsável por gerar uma referência de corrente com base no erro de rastreamento de velocidade [28]. Para o controle de corrente, utiliza-se um regulador de histerese, operando com *soft-chopping* [29]. A saída deste regulador tem a função de determinar o estado das chaves do conversor AHB. O bloco *Sig* determina qual fase encontra-se no intervalo de excitação.

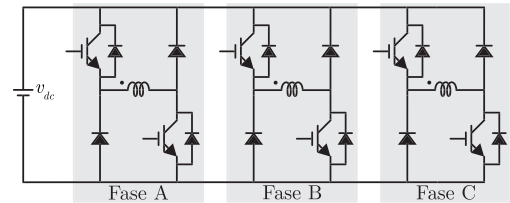


Fig. 2. Conversor AHB trifásico.

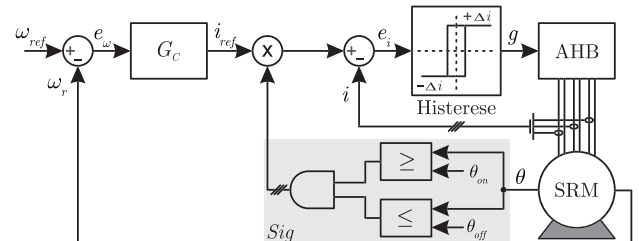


Fig. 3. Diagrama de blocos da estrutura de controle utilizada.

Neste trabalho, busca-se otimizar o desempenho do SRM através de um compromisso entre ondulações de torque e perdas nos enrolamentos. Dessa forma, propõe-se a função custo  $F(\theta_{on}, \theta_{off})$ , utilizada pelos algoritmos de otimização, definida como,

$$F(\theta_{on}, \theta_{off}) = \bar{T}_{ripple} + \bar{i}_{rms}^2. \quad (8)$$

onde  $\bar{T}_{ripple}$  é a ondulação de torque normalizada e  $\bar{i}_{rms}^2$  é o valor eficaz ao quadrado da corrente em uma das fases da máquina normalizado. O processo de normalização das variáveis é feito através da divisão pelo maior valor observado durante as simulações para um determinado valor de velocidade.

A ondulação de torque é calculada como,

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}}. \quad (9)$$

onde  $T_{max}$  é o valor máximo,  $T_{min}$  é o valor mínimo e  $T_{avg}$  é o valor médio do torque eletromagnético do SRM, medidos quando o sistema encontra-se em regime permanente.

Optou-se por utilizar  $\bar{i}_{rms}^2$  na função custo, em vez do valor RMS da corrente, para melhor refletir as perdas em condução. Além disso, ao elevar-se os valores de corrente ao quadrado, a diferença entre os pontos torna-se mais discrepante, favorecendo o processo de otimização. Somando-se a isso, o termo de fluxo, utilizado em trabalhos como [16] e [19], não é considerado. Isto é feito pois em SRMs operando abaixo da velocidade base as perdas de condução são predominantes, com as perdas no ferro tornando-se mais significativas somente nas altas velocidades [17]. Além disso, a minimização da corrente RMS é uma abordagem suficientemente eficaz, dado que resulta em menores perdas de condução e um menor pico de fluxo [11].

Os ângulos ótimos também sofrem influência da carga mecânica aplicada ao SRM [17], [30]. No entanto, a fim de evitar resultados baseados em tabelas de busca (dependentes de velocidade e carga mecânica), optou-se por desconsiderar este efeito no procedimento de otimização. Uma análise da sensibilidade dos resultados frente a variação de carga mecânica será apresentada na Seção III-D.

Nas subseções a seguir serão descritos os algoritmos propostos.

#### A. Otimização por Varredura de Parâmetros

O fluxograma que ilustra o procedimento para otimização por varredura de parâmetros proposto é apresentado na Figura 4, e foi implementado no *software* Matlab/Simulink com os parâmetros de inicialização descritos na Tabela I.

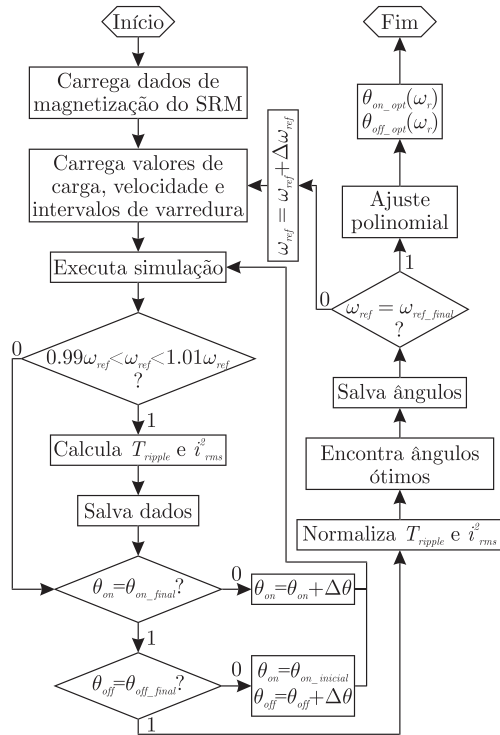


Fig. 4. Fluxograma do procedimento de otimização por varredura de parâmetros.

TABELA I

#### Parâmetros de Inicialização da Otimização por Varredura de Parâmetros.

Símbolo	Descrição	Valor
$T_L$	Carga	5 N.m
$\omega_{ref\_inicial}$	Velocidade inicial	10 rad/s
$\omega_{ref\_final}$	Velocidade final	100 rad/s
$\Delta\omega_{ref}$	Passo velocidade	10 rad/s
$\theta_{on\_inicial}$	Ângulo de acionamento inicial	23°
$\theta_{on\_final}$	Ângulo de acionamento final	30°
$\theta_{off\_inicial}$	Ângulo de desligamento inicial	38°
$\theta_{off\_final}$	Ângulo de desligamento final	44°
$\Delta\theta$	Passo ângulo	0,25°

Inicialmente, os dados de magnetização do SRM são carregados, juntamente com os parâmetros de inicialização. Em seguida, os dados são enviados para o Simulink e o processo de simulação é iniciado. No final de cada simulação, a velocidade média é calculada e verifica-se se apresenta um erro aceitável em relação a velocidade de referência, neste caso  $\pm 1\%$ . Se o erro for maior que  $\pm 1\%$ , a combinação de ângulos é desconsiderada no processo de otimização. Por outro lado, se a velocidade de referência for atingida, os valores da ondulação do torque e corrente RMS na fase “a” são armazenados.

No passo seguinte, o ângulo  $\theta_{on}$  é incrementado e o processo é repetido até que a condição  $\theta_{on} = \theta_{on\_final}$  seja atingida. Depois que  $\theta_{on\_final}$  é atingido, o valor é reiniciado e  $\theta_{off}$  é incrementado. O processo se encerra quando  $\theta_{off} = \theta_{off\_final}$ . Na Figura 5.a e 5.b são apresentados, respectivamente, o torque eletromagnético e a corrente para fase “a”. São consideradas quatro diferentes condições para  $\theta_{on}$  (23°, 25°, 27° e 29°) enquanto  $\theta_{off}$  é mantido fixo em 40°. Já nas Figuras 5.c e 5.d mostra-se, respectivamente, o torque eletromagnético e a corrente para quatro condições onde  $\theta_{off}$  é alterado enquanto o  $\theta_{on}$  é mantido fixo em 25°.

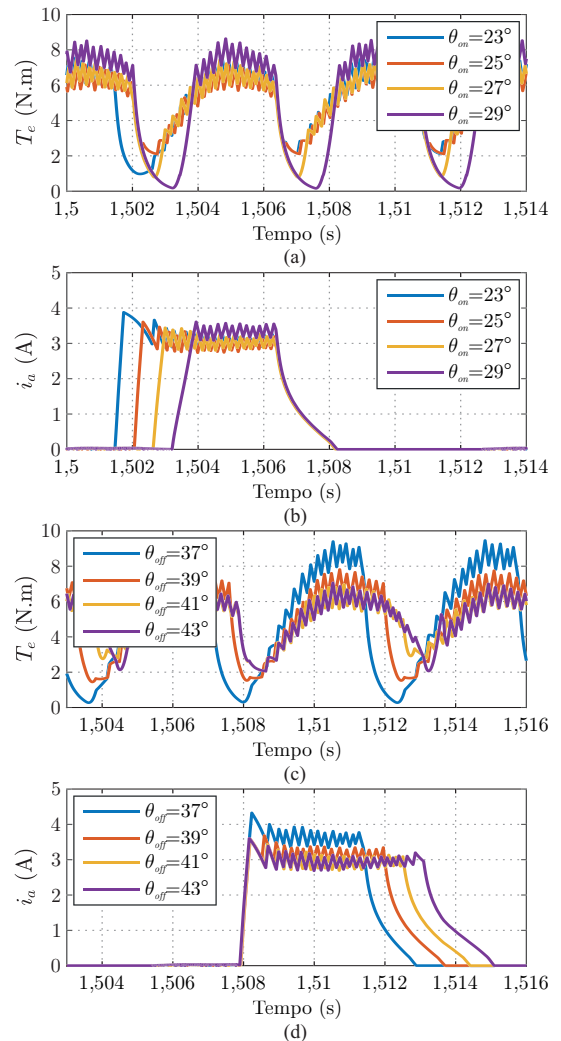


Fig. 5. Resultados de simulação para uma velocidade de 60 rad/s. (a) Torque eletromagnético para diferentes valores de  $\theta_{on}$ . (b) Corrente na fase “a” para diferentes valores de  $\theta_{on}$ . (c) Torque eletromagnético para diferentes valores de  $\theta_{off}$ . (d) Corrente na fase “a” para diferentes valores de  $\theta_{off}$ .

Dispondo dos dados de todas as simulações, encontra-se os valores máximos de ondulação de torque e corrente RMS, a fim de normalizar os resultados. A função custo é então computada para todos os pontos, e o ponto com menor custo é localizado. Os ângulos de disparo correspondentes a este ponto são salvos como os valores ótimos para velocidade em questão. Na Figura 6, verificam-se os resultados de ondulação de torque normalizada, corrente RMS ao quadrado normalizada e função custo para uma velocidade de 60 rad/s.



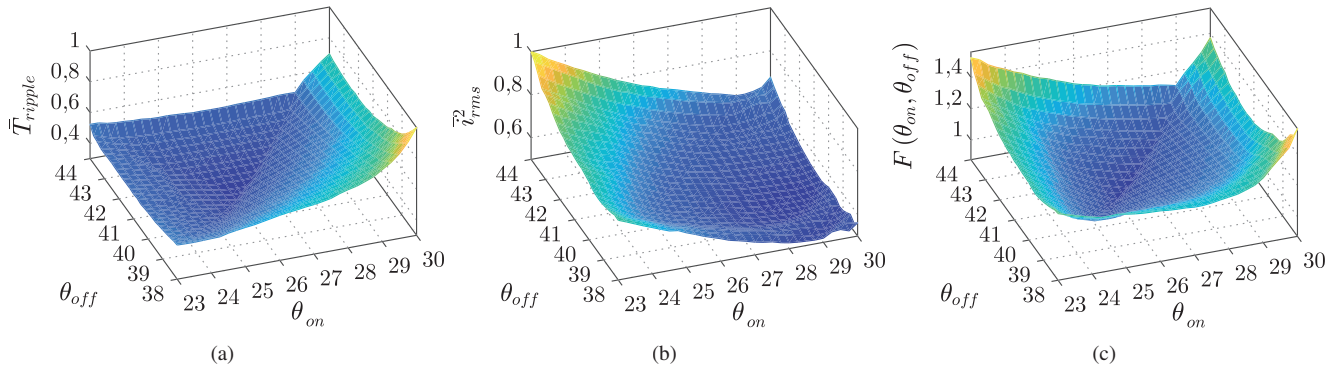


Fig. 6. Resultados das simulações para uma velocidade de 60 rad/s. (a) Ondulação de torque normalizada. (b) Corrente RMS ao quadrado normalizada. (c) Função custo.

Para este caso, o valor mínimo da função custo está localizado em  $\theta_{on} = 26,5^\circ$  e  $\theta_{off} = 41,5^\circ$ .

Na Figura 7 são apresentadas as formas de onda de torque eletromagnético e corrente na fase “a” para uma velocidade de 60 rad/s. Para fins de comparação são avaliados três casos distintos, operando nas condições de menor ondulação de torque (Caso 1), menores perdas (Caso 2) e na condição ótima (Ótimo), resultante do procedimento de otimização.

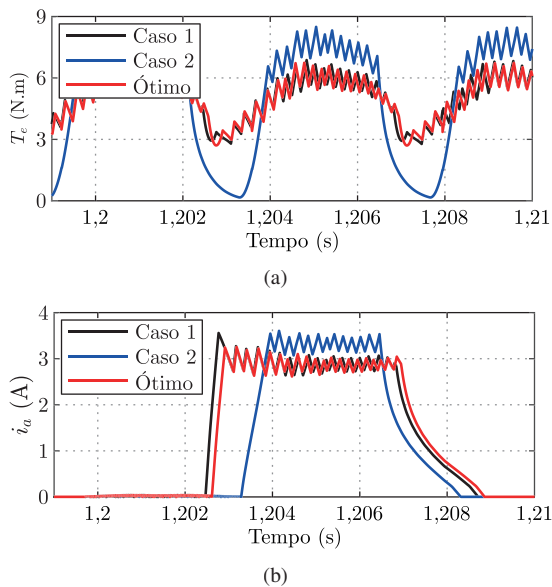


Fig. 7. Resultados das simulações para uma velocidade de 60 rad/s. (a) Torque eletromagnético. (b) Corrente na fase “a”.

O processo de simulação é repetido até que o último valor de velocidade seja avaliado. Com os ângulos de disparo ótimos para cada valor de velocidade, realiza-se uma regressão linear, onde os dados são ajustados a uma reta, permitindo fácil implementação em um microprocessador. Assim, os ângulos de disparo ótimos para operação abaixo da velocidade base são dados por

$$\begin{aligned} \theta_{on\_opt}(\omega_r) &= -0,0198|\omega_r| + 27,72 \\ \theta_{off\_opt}(\omega_r) &= -0,0198|\omega_r| + 42,72 \end{aligned} \quad (10)$$

Realizou-se um total de 7250 simulações ao longo da execução do algoritmo de otimização por varredura de parâmetros.

### B. Otimização por Enxame de Partículas

O procedimento de otimização por exame de partículas proposto é apresentado no fluxograma da Figura 8. Utilizou-se o *software* Matlab/Simulink e os parâmetros de inicialização apresentados nas Tabelas I e II. O número de épocas e partículas foi escolhido com base em testes preliminares, optando-se por valores que resultaram em boa convergência e baixo custo computacional. Optou-se por coeficientes cognitivo e social iguais, seguindo diretrizes dadas em [25].

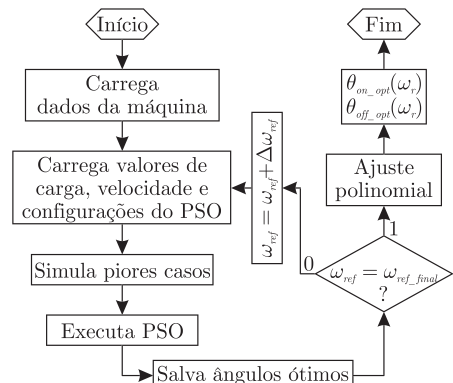


Fig. 8. Fluxograma do procedimento de otimização por enxame de partículas.

TABELA II

Parâmetros de Inicialização da Otimização por Enxame de Partículas.

Símbolo	Descrição	Valor
$N$	Número de partículas	5
$M$	Número de épocas	25
$\psi_1$	Coefficientes cognitivo	0,5
$\psi_2$	Coefficientes social	0,5

Inicialmente, os dados de magnetização do SRM são carregados, juntamente com os parâmetros de inicialização do PSO. Em seguida, duas simulações são executadas a fim de obter os valores máximos de ondulação de torque e corrente RMS. Como a normalização das variáveis da função custo é feita para cada partícula ao fim de cada simulação, se faz necessário o conhecimento prévio destes valores. Na sequência, os dados são enviados para o Simulink e a execução do algoritmo PSO tem início. Ao fim de cada simulação

verifica-se se a velocidade de referência foi atingida, e, caso não seja, atribui-se um valor a função custo de  $F(\theta_{on}, \theta_{off}) = 1000$ , indicando ao algoritmo que aquela combinação de ângulos não é apropriada. Uma vez que o algoritmo PSO atinge o número definido de épocas, os ângulos referentes ao melhor ponto conhecido são armazenados como ângulos de disparo ótimos para a velocidade avaliada.

Na Figura 9 mostra-se os resultados de simulação do algoritmo PSO em quatro épocas diferentes, para uma velocidade de 60 rad/s. Quando comparado com os contornos da Figura 6.c, mostrados em segundo plano, é possível observar que o algoritmo converge para o mínimo da função, assim como o método de varredura de parâmetros, enquanto realiza um número significativamente menor de simulações.

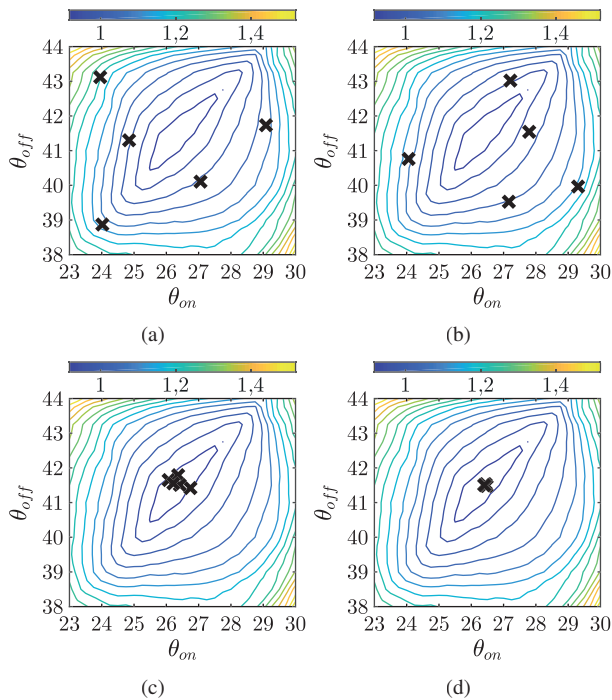


Fig. 9. Resultados das simulações para uma velocidade de 60 rad/s. (a) Época 1. (b) Época 10. (c) Época 18. (d) Época 25.

Mostra-se na Figura 10 a evolução do melhor valor encontrado para a função custo com o passar das épocas, evidenciando a convergência do algoritmo PSO.

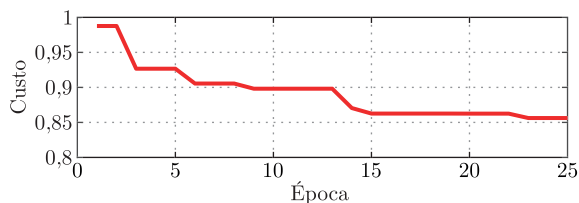


Fig. 10. Melhor valor para a função custo para cada época.

Novamente, o processo de simulação é repetido para todos os valores de velocidade e, ao fim do processo, é realizada uma regressão linear dos ângulos de disparo ótimos.

$$\begin{aligned} \theta_{on\_opt}(\omega_r) &= -0,0189|\omega_r| + 27,71 \\ \theta_{off\_opt}(\omega_r) &= -0,0192|\omega_r| + 42,75. \end{aligned} \quad (11)$$

Realizou-se um total de 1270 simulações ao longo

da execução do algoritmo de otimização por enxame de partículas, equivalente a uma redução de 82,5% do esforço computacional quando comparado ao algoritmo de otimização por varredura de parâmetros.

### C. Comparação dos Procedimentos de Otimização

Os resultados de ângulos de disparo ótimos e o mínimo valor verificado da função custo para os procedimentos de otimização por varredura de parâmetros e exame de partículas são apresentados na Tabela III. Primeiramente, verifica-se que os resultados para os ângulos em ambos os casos são similares. Observa-se ainda que em certas velocidades o procedimento com algoritmo PSO é capaz de encontrar menores valores para a função custo que o procedimento por varredura, indicando que uma condição com melhor desempenho foi localizada. Deve-se ressaltar que devido a natureza randômica de inicialização do algoritmo PSO, os resultados podem variar, entretanto, com um número grande o suficiente de partículas e épocas, a convergência do algoritmo é verificada.

TABELA III  
Resultados das Otimizações por Varredura de Parâmetros e Enxame de Partículas

$\omega_r$ (rad/s)	Varredura			PSO		
	$\theta_{on}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{off}$ ( $^\circ$ )	Custo	$\theta_{on}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{off}$ ( $^\circ$ )	Custo
10	27,75	42,75	0,8714	27,66	42,68	0,8538
20	27,25	42,25	0,9857	27,41	42,57	0,9914
30	27,00	42,00	0,9657	27,00	42,00	0,9889
40	27,00	42,00	0,9746	26,69	41,69	0,9582
50	26,75	41,75	0,9229	26,78	41,78	0,9204
60	26,50	41,50	0,8744	26,48	41,48	0,8562
70	26,00	41,00	0,7812	26,48	41,51	0,7836
80	26,00	41,00	0,8070	26,50	41,51	0,7993
90	26,00	41,00	0,7634	25,99	40,99	0,7744
100	26,00	41,00	0,5534	25,68	40,75	0,5554

A fim de verificar a dispersão dos resultados do algoritmo PSO, executou-se 10 vezes o procedimento para a velocidade de 60 rad/s. A partir dos resultados obtidos, pode-se calcular o coeficiente de variação para os valores finais da função custo e para os ângulos  $\theta_{on}$  e  $\theta_{off}$ , segundo (12),

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (12)$$

onde  $CV$  é o coeficiente de variação,  $\sigma$  é o desvio padrão e  $\mu$  é a média. Os resultados são

$$CV_{\theta_{on}} = 0,49\%; \quad CV_{\theta_{off}} = 0,30\%; \quad CV_{F(\theta_{on}, \theta_{off})} = 0,67\%. \quad (13)$$

Uma baixa dispersão é verificada entre os resultados, indicando boa convergência e repetibilidade do procedimento proposto.

### D. Sensibilidade à Carga Mecânica

Os ângulos de disparo ótimos também são influenciados pela carga mecânica aplicada ao SRM [17], [30]. A estimação desta grandeza, porém, é de maior complexidade quando comparada a medida de velocidade, disponível no acionamento em velocidade variável. Somando-se a isso, considerar diferentes valores de carga no procedimento de otimização eleva significativamente o custo computacional do

problema. O resultado do procedimento passa a ser uma tabela de busca de ângulos de disparo ótimos, demandando significativa alocação de memória na implementação prática e elevando a complexidade do algoritmo de controle.

Dado que a proposta desconsidera o torque de carga no procedimento de otimização, esta seção tem como objetivo avaliar a sensibilidade dos resultados obtidos frente a variações de carga mecânica. Apresenta-se na Figura 11 o resultado da otimização para diferentes valores de carga a uma velocidade de 60 rad/s.

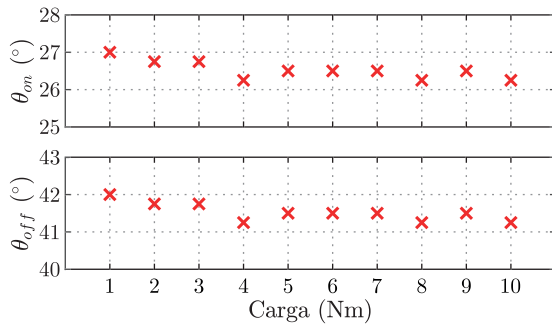


Fig. 11. Ângulos de disparo ótimos em função da carga mecânica.

Para situações com baixa carga, nota-se maior diferença com relação ao valor ótimo. Nestas condições, entretanto, a operação de motores elétricos é de menor interesse. Para condições de média e alta carga os valores são muito similares ou iguais ao valor ótimo obtido. O algoritmo, então, opera boa parte do tempo na região ótima, ou próximo dela. Para condições de menor carga, o SRM opera em uma região sub-ótima. Desta forma, mesmo desconsiderando o efeito de diferentes valores de torque de carga, garante-se desempenho satisfatório para o sistema, aliado a simplicidade de implementação, uma vez que não é utilizada uma tabela de busca para os ângulos de disparo.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados resultados experimentais para um SRM operando com ângulos de disparo variáveis, a fim de validar os procedimentos de otimização propostos. A bancada experimental utilizada é apresentada na Figura 12. O SRM utilizado, descrito na Seção III, é acoplado a uma máquina de indução, que opera na condição de gerador auto-excitado. Os terminais da máquina de indução são conectados a um banco de capacitores e cargas resistivas, provendo carga para o SRM. Uma fonte regulada de tensão (500V/20A) é conectada ao barramento CC. Um decibelímetro da marca Minipa, modelo MSL-1350, foi utilizado para medição de ruído sonoro durante a operação do SRM, buscando verificar a influência das oscilações de torque nesta grandeza.

O sistema de controle é implementado em um processador digital de sinais TMS320F28335 da Texas Instruments e a posição rotórica é obtida através de um *encoder* absoluto de 10 bits. A frequência de amostragem utilizada é  $f_s = 30\text{kHz}$ .

Inicialmente, foram obtidos resultados experimentais para o SRM operando nas velocidades de 20, 60 e 100 rad/s. O sistema foi avaliado para as condições de menor ondulação de torque (Caso 1), menores perdas (Caso 2) e para a condição resultante do procedimento de otimização (Ótimo).

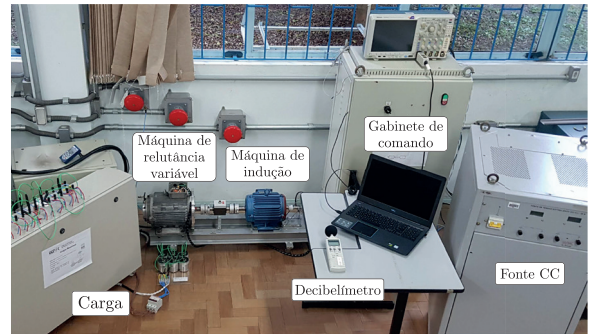


Fig. 12. Bancada experimental do SRM.

Mostra-se nas Figuras 13 e 14 as formas de onda de torque eletromagnético e corrente na fase “a”, respectivamente. As formas de onda de torque eletromagnético são obtidas através da tabela de busca de torque [27], fazendo uso dos dados experimentais de corrente e posição rotórica, armazenados na memória do DSP. O desempenho dos três casos, para os diferentes valores de velocidade, também pode ser avaliado através dos resultados apresentados na Tabela IV.

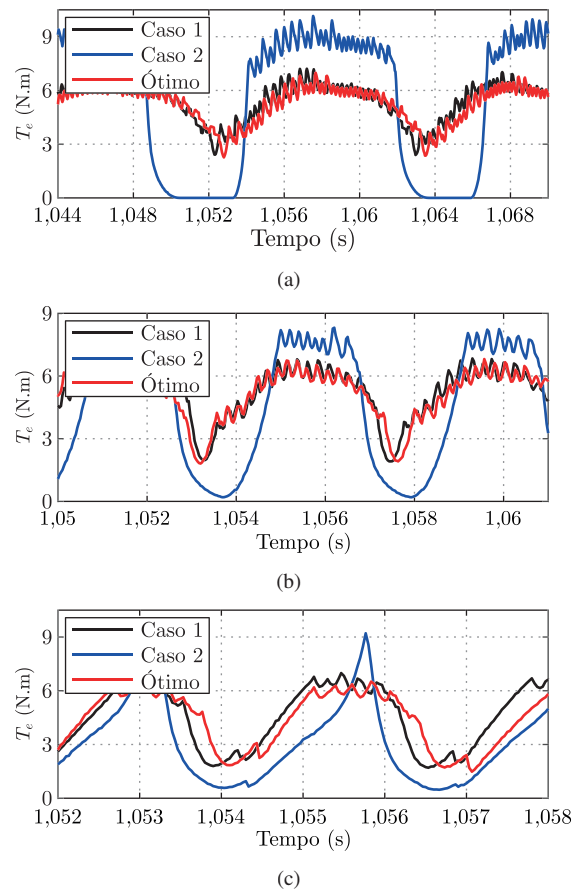


Fig. 13. Resultados experimentais de torque eletromagnético para diferentes velocidades. (a) 20 rad/s. (b) 60 rad/s. (c) 100 rad/s.

Para o caso 1, verifica-se menor ondulação de torque para as três velocidades avaliadas, porém, tem-se a maior amplitude de corrente e, consequentemente, maiores perdas. Tem-se ainda a condição com menor valor de ruído sonoro, avaliado na velocidade de 60 rad/s. Na situação de menores perdas, caso 2, observa-se os menores valores de corrente RMS, no entanto, tem-se elevada ondulação de torque e ruído acústico.

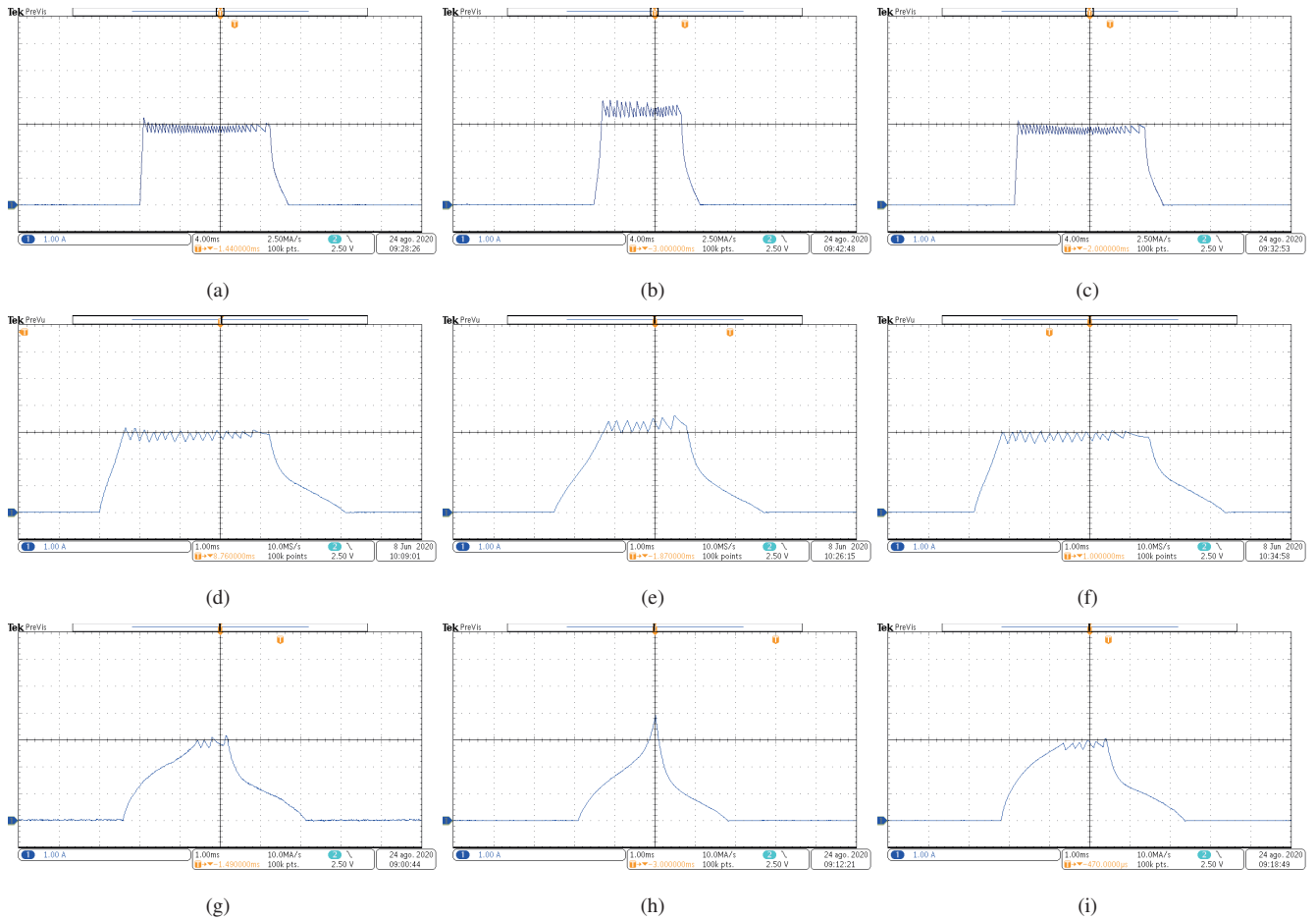


Fig. 14. Resultados experimentais de corrente na fase “a”. Velocidade de 20 rad/s: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Ótimo. Velocidade de 60 rad/s: (d) Caso 1; (e) Caso 2; (f) Ótimo. Velocidade de 100 rad/s: (g) Caso 1; (h) Caso 2; (i) Ótimo.

**TABELA IV**  
Resultados Experimentais para Diferentes Casos

$\omega_r$	Variável	Caso 1	Caso 2	Ótimo
20 rad/s	$i_{rms}$ (A)	1,857	1,663	1,818
	$T_{avg}$ (N.m)	5,21	4,94	5,06
	$T_{ripple}$ (%)	92,3	197,9	95,15
60 rad/s	$i_{rms}$ (A)	1,717	1,512	1,691
	$T_{avg}$ (N.m)	5,12	4,46	5,00
	$T_{ripple}$ (%)	100,5	189,0	102,4
	Ruído sonoro (dB)	65,8	77,6	69,1
100 rad/s	$i_{rms}$ (A)	1,601	1,178	1,567
	$T_{avg}$ (N.m)	4,46	3,17	4,23
	$T_{ripple}$ (%)	121,6	293,5	135,1

Destaca-se ainda que para o resultado na velocidade de 100 rad/s, o intervalo reduzido e elevada força contraeletromotriz levam a uma operação em pulso único. O caso ótimo apresenta um bom compromisso entre ondulação de torque e amplitude de corrente, conferindo bom desempenho ao SRM em toda faixa de velocidade avaliada. Note que a função custo utilizada pode ser modificada, a fim de atender uma métrica diferente, enquanto ainda fazendo uso do procedimento descrito.

Com o objetivo de avaliar o funcionamento da estratégia proposta, mostra-se na Figura 15 um resultado com velocidade variável. A referência de velocidade é constituída de duas rampas seguidas de dois patamares constantes, nas velocidades de 50 e 100 rad/s. O perfil é espelhado a fim de

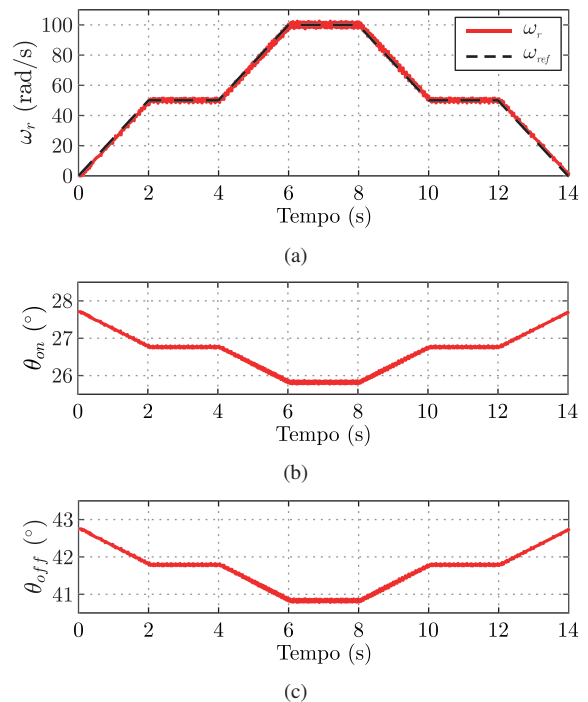


Fig. 15. Resultados experimentais para velocidade variável. (a) Velocidade medida e de referência. (b) Ângulo  $\theta_{on}$ . (c) Ângulo  $\theta_{off}$ .



## V. CONCLUSÃO

que a característica de desaceleração também seja verificada. Os ângulos de disparo são calculados pelas retas dadas em (11). Observa-se o rastreamento satisfatório da referência de velocidade. Os ângulos são ajustados de acordo com a velocidade rotórica, permitindo ao SRM operar na região determinada pelo procedimento de otimização.

Na Figura 16, apresenta-se a resposta para um degrau de carga mecânica. A referência de velocidade do SRM é ajustada para 100 rad/s e no instante  $t = 3$  s uma carga mecânica é adicionada ao eixo. A carga é imposta por meio de um gerador de indução auto-excitado alimentando uma carga resistiva isolada, composta por três resistores de  $90 \Omega$  ligados em Y. As formas de onda de corrente na fase “a” antes e após o degrau de carga podem ser vistas nas Figuras 16.d e 16.e, respectivamente.

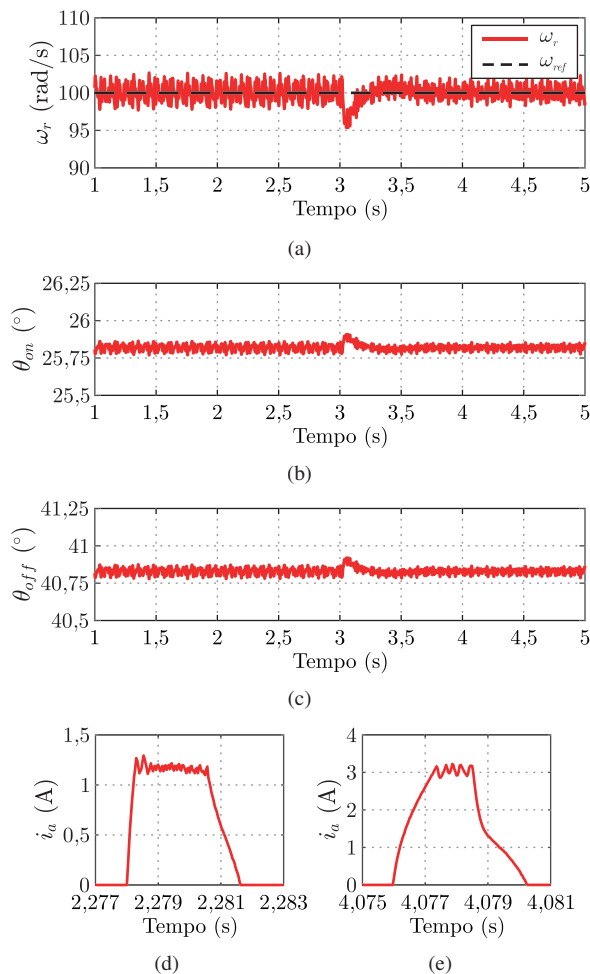


Fig. 16. Resultados experimentais para degrau de carga mecânica. (a) Velocidade medida e de referência. (b) Ângulo  $\theta_{on}$ . (c) Ângulo  $\theta_{off}$ . (d) Corrente na fase “a” antes do degrau de carga. (e) Corrente na fase “a” após o degrau de carga.

Observa-se boa regulação de velocidade frente ao distúrbio de carga. Os ângulos são brevemente alterados durante o degrau de carga, acompanhando o transitório de velocidade. Por fim, verifica-se uma elevação na amplitude da corrente de fase, decorrente da conexão de carga ao gerador de indução.

Este trabalho apresentou um procedimento para otimização dos ângulos de disparo de um motor de relutância variável via algoritmo de enxame de partículas. O procedimento mostrou-se igualmente capaz de localizar parâmetros ótimos, quando comparado a uma abordagem por varredura de parâmetros, enquanto reduzindo o esforço computacional em aproximadamente 82,5%. Ainda, o procedimento com PSO mostrou baixa dispersão entre os resultados, indicando a boa repetibilidade do algoritmo. Através da análise de sensibilidade à carga mecânica, mostrou-se os efeitos da simplificação, o que faz com que o sistema opere em uma região sub-ótima para certos valores de carga. Resultados de simulação e experimentais comprovaram que o procedimento proposto alcançou um desempenho com balanço entre eficiência energética e ondulações de torque.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer ao INCT-GD, CNPq (CNPq 465640/2014-1, CNPq 424997/2016-9, CNPq 309536/2018-9), CAPES (23038.000776/2017-54) e FAPERGS (17/2551-0000517-1).

## REFERÊNCIAS

- [1] B. Bilgin, B. Howey, A. D. Callegaro, J. Liang, M. Kordic, J. Taylor, A. Emadi, “Making the Case for Switched Reluctance Motors for Propulsion Applications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, pp. 7172–7186, July 2020, doi:10.1109/TVT.2020.2993725.
- [2] M. Krishnamurthy, C. S. Edrington, A. Emadi, P. Asadi, M. Ehsani, B. Fahimi, “Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 659–675, May 2006.
- [3] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, D. Dorrell, “Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5696–5711, Oct 2014.
- [4] C. R. D. Osório, F. P. Scalcon, G. G. Koch, V. F. Montagner, R. P. Vieira, H. A. Gründling, “Controle Robusto Aplicado a Geradores de Relutância Variável Conectados à Rede”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 25, no. 3, pp. 272–282, Set 2020, doi: 10.18618/REP.2020.3.0015.
- [5] G. Wathewaduge, E. Sayed, A. Emadi, B. Bilgin, “Electromagnetic Modeling Techniques for Switched Reluctance Machines: State-of-the-Art Review”, *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 218–234, Aug 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.3016242.
- [6] A. D. Callegaro, B. Bilgin, A. Emadi, “Radial Force Shaping for Acoustic Noise Reduction in Switched

- Reluctance Machines”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 9866–9878, Oct 2019.
- [7] A. D. Callegaro, J. Liang, J. W. Jiang, B. Bilgin, A. Emadi, “Radial Force Density Analysis of Switched Reluctance Machines: The Source of Acoustic Noise”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 93–106, Mar 2019, doi: 10.1109/TTE.2018.2887338.
- [8] N. K. Sheth, K. R. Rajagopal, “Calculation of the flux-linkage characteristics of a switched reluctance motor by flux tube method”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 4069–4071, Oct 2005, doi:10.1109/TMAG.2005.854865.
- [9] B. Bilgin, A. Emadi, “Electric Motors in Electrified Transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system”, *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 10–17, July 2014.
- [10] H. Li, B. Bilgin, A. Emadi, “An Improved Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Machines”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 2, pp. 1635–1644, Feb 2019.
- [11] D. A. Torrey, “Switched reluctance generators and their control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 3–14, Feb 2002, doi: 10.1109/41.982243.
- [12] C. Mademlis, I. Kioskeridis, “Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 3, pp. 448–457, Sept 2003.
- [13] I. Kioskeridis, C. Mademlis, “Maximum efficiency in single-pulse controlled switched reluctance motor drives”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 809–817, Dec 2005.
- [14] I. Kioskeridis, C. Mademlis, “A Unified Approach for Four-Quadrant Optimal Controlled Switched Reluctance Machine Drives With Smooth Transition Between Control Operations”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 301–306, Jan 2009.
- [15] C. Mademlis, I. Kioskeridis, “Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 556–565, Sept 2005.
- [16] P. J. d. S. Neto, T. A. d. S. Barros, M. V. de Paula, R. R. de Souza, E. R. Filho, “Design of Computational Experiment for Performance Optimization of a Switched Reluctance Generator in Wind Systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 1, pp. 406–419, Mar 2018.
- [17] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, J. K. Lin, Z. Zhang, K. F. Luk, T. W. Ng, N. C. Cheung, “Optimal Control Method of Motoring Operation for SRM Drives in Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1191–1204, Mar 2010.
- [18] V. P. Vujicic, “Minimization of Torque Ripple and Copper Losses in Switched Reluctance Drive”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 388–399, Jan 2012.
- [19] T. A. d. S. Barros, P. S. N. Filho, A. B. Morreira, E. R. Filho, “Algoritmos para otimização do desempenho de geradores a relutância variável aplicados em geração eólica”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 21, no. 1, pp. 32–41, Fev 2016, doi:10.18618/REP.2016.1.2572.
- [20] S. E. H. Randy L. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, 2 ed., John Wiley, 2004.
- [21] L. C. Borin, C. R. D. Osório, G. G. Koch, T. S. Gabbi, R. C. L. F. Oliveira, V. F. Montagner, “Robust Control Design Procedure Based on Particle Swarm Optimization and Kharitonov’s Theorem with an Application for PMSMs”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 25, no. 2, pp. 219–229, Jun 2020, doi: 10.18618/REP.2020.2.0008.
- [22] C. Ma, L. Qu, “Multiobjective Optimization of Switched Reluctance Motors Based on Design of Experiments and Particle Swarm Optimization”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 1144–1153, Sept 2015.
- [23] J. Zhang, H. Wang, L. Chen, C. Tan, Y. Wang, “Multi-Objective Optimal Design of Bearingless Switched Reluctance Motor Based on Multi-Objective Genetic Particle Swarm Optimizer”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 1, pp. 1–13, Jan 2018.
- [24] B. Bilgin, J. Jiang, A. Emadi, *Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications*, CRC Press, 2019.
- [25] J. Kennedy, R. Eberhart, “Particle swarm optimization”, in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948 vol.4, Dec 1995.
- [26] S. S. Rao, *Engineering Optimization - Theory and Practice*, 4 ed., Wiley, 2009.
- [27] T. A. D. S. Barros, P. J. D. S. Neto, M. V. D. Paula, A. B. Moreira, P. S. N. Filho, E. R. Filho, “Automatic Characterization System of Switched Reluctance Machines and Nonlinear Modeling by Interpolation Using Smoothing Splines”, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 26011–26021, April 2018.
- [28] F. P. Scalcon, C. R. D. Osório, G. G. Koch, T. S. Gabbi, R. P. Vieira, H. Gründling, R. C. L. Oliveira, V. F. Montagner, “Robust Control of Synchronous Reluctance Motors by Means of Linear Matrix Inequalities”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.3028568.
- [29] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, CRC Press, 2001.
- [30] M. V. de Paula, T. A. d. S. Barros, H. S. Moreira, E. H. Catata, M. G. Villalva, E. R. Filho, “A Dahlin Cruise Control Design Method for Switched Reluctance Motors with Minimum Torque Ripple Point Tracking Applied in Electric Vehicles”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, pp. 1–1, 2020.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Filipe Pinarello Scalcon**, nasceu em Santa Maria, RS, Brasil em 1995. Possui graduação (2017) e mestrado (2019) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Atualmente é aluno de doutorado na mesma instituição, onde desenvolve seus trabalhos no Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC). Seus interesses de pesquisa incluem controle de máquinas elétricas, máquinas de relutância e controle robusto.

**Thieli Smidt Gabbi**, nasceu em Santa Maria, RS, Brasil em 1989. Recebeu o título de Engenheira Eletricista pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2013, e os títulos de Mestre e Doutora em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CAPES 6) da UFSM, em 2015 e 2019, respectivamente. Atualmente é Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Suas áreas de pesquisa incluem controle de sistemas e observação de estados, acionamento de máquinas elétricas e eletrônica de potência.

**Rodrigo Padilha Vieira**, nasceu em Cruz Alta, RS, Brasil, em 1983, é engenheiro eletricista pela Unijuí (2007), mestre (2008) e doutor (2012) em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Brasil. Atualmente é Professor Adjunto na UFSM e pesquisador junto ao Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC). Seus temas de pesquisa incluem máquinas elétricas, técnicas de controle por modos deslizantes, observadores por modos deslizantes e técnicas de controle aplicadas a conversores estáticos.

**Hilton Abílio Gründling**, nasceu em Santa Maria, RS, Brasil, em 1954. Recebeu o título de engenheiro eletricista pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, em 1977, e o título de mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 1980. É doutor em engenharia elétrica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, Brasil, em 1995. Desde 1980, é professor da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Suas áreas de pesquisa incluem controle adaptativo, controle discreto, e aplicações em sistemas de controle.