

Otimização dos Ângulos de Disparo de um Motor de Relutância Variável via Algoritmo de Enxame de Partículas

Filipe P. Scalcon*, Thieli S. Gabbi**, Rodrigo P. Vieira*
e Hilton A. Gründling*

* *Grupo de Eletrônica de Potência e Controle, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: filipescalcon1@gmail.com).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, (e-mail: thielisgabbi@gmail.com).*

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, in order to minimize the torque ripple of the machine. The structure is intended for SRMs operating in the current controlled region, below base speed. The proposed procedure is compared with a traditional parameter sweeping approach. Simulation results demonstrate the superiority of the PSO algorithm procedure, obtaining results with less torque ripple and significantly reducing the computational effort.

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, a fim de minimizar ondulações de torque da máquina. A estrutura é destinada a SRMs operando na região de controle de corrente, abaixo da velocidade base. O procedimento proposto é comparado com uma abordagem tradicional de varredura de parâmetros. Resultados de simulação demonstram a superioridade do procedimento com algoritmo PSO, obtendo resultados com menor ondulação de torque e significativamente diminuindo o esforço computacional envolvido.

Keywords: Firing angles; Particle swarm optimization; Switched reluctance motor; Torque ripple.

Palavras-chaves: Ângulos de disparo; Motor de relutância variável; Ondulação de torque; Otimização por enxame de partículas.

1. INTRODUÇÃO

O interesse nas máquinas de relutância variável cresceu significativamente nas duas últimas décadas, sendo vista como uma concorrente viável para outras máquinas elétricas já estabelecidas. Dentre suas características destaca-se uma estrutura simples, composta por dupla saliência e enrolamentos concentrados, montados nas ranhuras do estator (Bilgin et al., 2020). 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, definido como torque de relutância. Isso se apresenta como uma vantagem, uma vez que a máquina não depende de ímãs ou correntes induzidas para excitação do rotor. Devido à sua estrutura simples, os custos de fabricação são menores e o processo de produção é mais simples quando comparada às máquinas de indução

e de ímãs permanentes (Staton et al., 1993; Krishnamurthy et al., 2006; Boldea et al., 2014; Osório et al., 2019).

A máquina, no entanto, apresenta algumas desvantagens. Devido à estrutura de dupla saliência, efeitos de saturação magnética e indutâncias de fase dependentes da posição rotórica, seu comportamento é altamente não-linear (Osório et al., 2020). Além disso, o SRM é propenso a elevada ondulação de torque, especialmente devido a natureza comutada da máquina. Durante a comutação de fases, o torque gerado por cada fase é somado, resultando em uma forma de onda pulsada. A comutação de alta frequência, oriunda do controlador de corrente, também contribui para oscilações de torque. A ondulação de torque é indesejável, dado que leva a produção de ruído acústico e vibrações mecânicas, que deterioram a máquina ao longo do tempo (Bilgin and Emadi, 2014; Li et al., 2019).

Durante a operação, os ângulos entre os quais ocorre a excitação de fase, conhecidos como ângulos de disparo, afetam significativamente o desempenho do motor. A escolha adequada pode levar a uma redução na ondulação de torque. Assim, uma série de trabalhos buscando melhorar as características de torque de SRMs através da escolha adequada dos ângulos de disparo foram realizados nos

* 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 e as agências financeiras (CNPq 465640/2014-1, CNPq Projeto 424997/2016-9, CAPES 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

últimos anos (Fisch et al., 1997; Mademlis and Kioskeridis, 2003; Kioskeridis and Mademlis, 2005; Mademlis and Kioskeridis, 2005; Neto et al., 2018).

Em Fisch et al. (1997), um algoritmo genético é usado para otimizar os ângulos de disparo, a fim de maximizar a produção de torque. Em Mademlis and Kioskeridis (2003) e mais tarde Kioskeridis and Mademlis (2005) são apresentadas extensas análises a cerca do efeito dos ângulos de disparo em um SRM operando abaixo e acima da velocidade base, respectivamente. Nos dois casos, a comutação dos ângulos é feita *on-line*, por controladores que não exigem as curvas de magnetização das máquinas. Resultados experimentais mostram que as técnicas propostas melhoram o desempenho geral do motor e apresentam um equilíbrio entre oscilação do torque e eficiência energética.

Mais recentemente, uma otimização multiobjetivo de desempenho baseada no planejamento de experimentos computacionais aplicada a geradores de relutância variável é proposta em (Neto et al., 2018). Os ângulos de disparo ótimos são determinados para diferentes velocidades por uma função custo contendo ondulação de torque, corrente RMS e valor máximo de fluxo. Duas estratégias diferentes de preenchimento de espaço são comparadas, sendo a *latin hypercube* capaz de reduzir significativamente o esforço computacional. Os ângulos ideais são implementados em função da velocidade e resultados experimentais são apresentados para operação em baixa e alta velocidade, mostrando um equilíbrio entre a oscilação do torque e a eficiência do sistema.

Neste trabalho é proposta uma estratégia para obtenção dos ângulos de disparo ótimos para um SRM baseado no algoritmo de otimização por enxame de partículas (do inglês *particle swarm optimization* - PSO), visando a minimização de ondulações de torque. O procedimento se destina a um SRM operando na região de controle de corrente, ou seja, abaixo da velocidade base. Uma abordagem tradicional de varredura de parâmetros é apresentada e, em seguida, uma alternativa é proposta, fazendo uso do algoritmo PSO. Com os resultados da otimização, um ajuste polinomial é realizado, permitindo-se a obtenção de uma reta, onde os ângulos ótimos são calculados em função da velocidade. Por fim, resultados de simulação para operação em velocidade variável são apresentados, comparando a ondulação de torque do motor para diferentes casos.

2. ÂNGULOS DE DISPARO

O motor de relutância variável tem excitação exclusivamente estatórica. 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 (Bilgin et al., 2019), 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 como,

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

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, ϕ é o fluxo da fase, i é a corrente de fase e θ é a posição rotórica.

Verifica-se que o intervalo de excitação, definido pelos ângulos de disparo, afeta de forma considerável a característica de conjugado da máquina, bem como da ondulação de torque. Nota-se ainda que o SRM apresenta características não-lineares, sendo o torque função de variáveis como posição e corrente, além do fato de ser afetado por fenômenos como saturação magnética. Assim, a busca por ângulos de disparo ótimos através de uma formulação analítica torna-se uma tarefa complexa (Mademlis and Kioskeridis, 2003).

Desta forma, a busca pelos ângulos de disparo ótimos por meio de algoritmos de otimização é de interesse. A estratégia de varredura de parâmetros é bastante utilizada na literatura, como visto em (Barros et al., 2016), por exemplo. Embora esta técnica apresente simples implementação e garanta que uma solução ótima será encontrada, verificam-se problemas, como o elevado número de avaliações da função custo. Além disso, com o crescimento do espaço de busca, o problema cresce exponencialmente. Um exemplo da estratégia pode ser visto na Figura 1 (a), onde todo o espaço de busca é avaliado, em pontos igualmente espaçados.

Como alternativa, pode-se optar pelo uso de outros algoritmos, a fim de reduzir o custo computacional. Dentre eles, destaca-se o algoritmo de otimização por enxame de partículas (Kennedy and Eberhart, 1995), inspirado na inteligência de grupos observados na natureza. Com base no conhecimento individual e global, um grupo de partículas aleatoriamente posicionados no espaço de busca se movimentam, a fim de encontrar a solução ótima para o problema. O comportamento do algoritmo pode ser visto na Figura 1 (b), onde verifica-se que com o passar das épocas as partículas se movimentam, eventualmente convergindo para o mínimo da função objetivo.

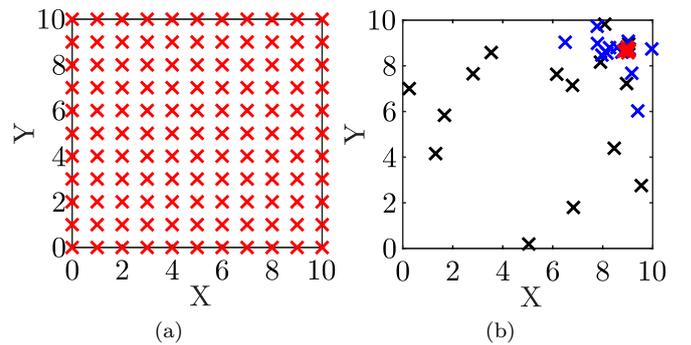


Figura 1. Exemplo do comportamento dos algoritmos de otimização. (a) Varredura de parâmetros. (b) Enxame de partículas.

3. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO DOS ÂNGULOS DE DISPARO DO SRM

Para a execução dos procedimentos de otimização, inicialmente construiu-se um modelo de simulação de um SRM

no *software* Matlab/Simulink, conforme apresentado em (Barros et al., 2018; Scalcon et al., 2018). O modelo faz uso de tabelas de busca com as características eletromagnéticas da máquina, bem como de um conversor estático meia-ponte assimétrica (AHB), necessário para o acionamento como motor. 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.

O diagrama de blocos da técnica de controle usada pode ser visto na Figura 2. Um controlador de velocidade robusto, projetado segundo (Scalcon et al., 2020), é usado para gerar uma corrente de referência com base no erro de rastreamento de velocidade. Para o controle de corrente, faz-se uso de um regulador de histerese, operando em *soft chopping*. A saída deste regulador é responsável por determinar o estado das chaves do conversor AHB.

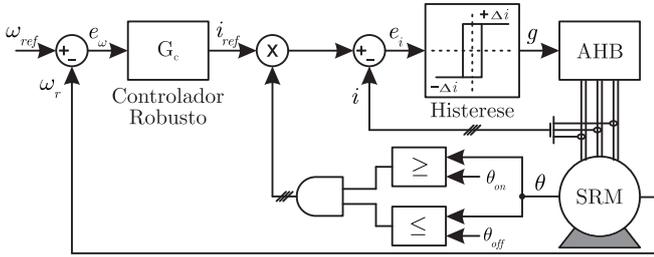


Figura 2. Diagrama de blocos da técnica de controle.

Como mencionando previamente, ondulações de torque são indesejáveis em SRMs. Dessa forma, os algoritmos de otimização terão como função objetivo minimizar a ondulação de torque, T_{ripple} , conforme equação (4),

$$F(\theta_{on}, \theta_{off}) = T_{ripple}. \quad (4)$$

A ondulação de torque é calculada da forma,

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (5)$$

em que, 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.

3.1 Otimização por varredura de parâmetros

O procedimento para otimização por varredura de parâmetros proposto é apresentado na Figura 3, e foi implementado no *software* Matlab/Simulink com os parâmetros de inicialização apresentados na Tabela 1.

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 verificada 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, o valor da ondulação do torque é armazenado.

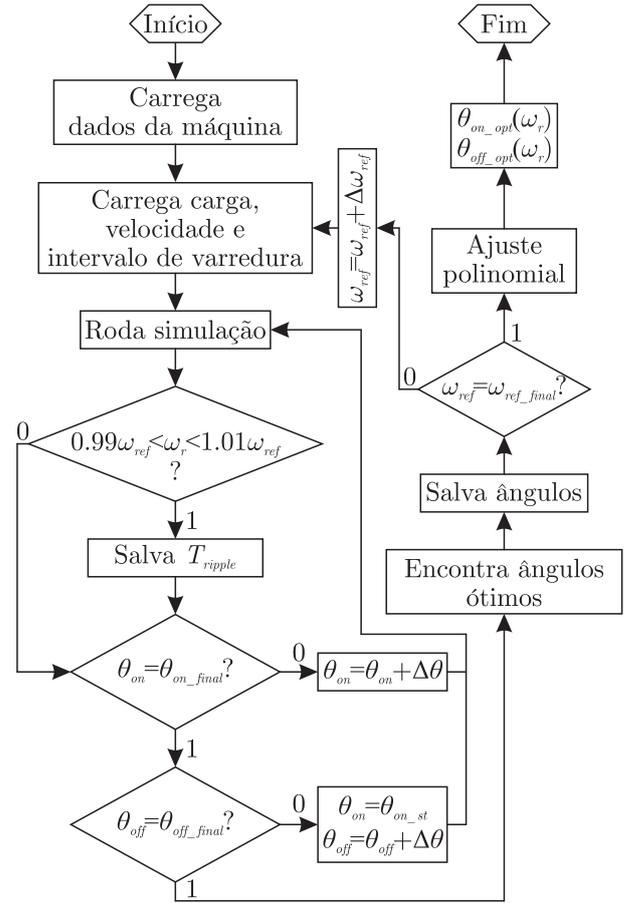


Figura 3. Procedimento proposto de otimização por varredura de parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros de inicialização da otimização por varredura.

Parâmetro	Valor
Intervalo de velocidade	[20,100] rad/s
Passo de velocidade	20 rad/s
Intervalo θ_{on}	[23°,30°]
Intervalo θ_{off}	[38°,44°]
Passo θ	0.25°
Carga	5 Nm

Em seguida, o ângulo θ_{on} é incrementado e o processo é repetido até que a condição $\theta_{on} = \theta_{on_final}$ seja atingida. Depois que θ_{on_final} é atingido, o valor é reiniciado e θ_{off} será incrementado. O processo se encerra quando $\theta_{off} = \theta_{off_final}$ e, dispondo dos dados de todas as simulações, encontra-se o ponto com menor ondulação de torque. Os ângulos de disparo correspondentes a este ponto são salvos como os valores ótimos para velocidade em questão. Na Figura 4 verifica-se os resultados de ondulação de torque normalizados, para a velocidade de 60 rad/s.

O processo de simulação é repetido até que o último valor de velocidade seja avaliado. Com os ângulos de disparo ótimos, é realizado um ajuste polinomial, onde os dados são ajustados por uma reta, permitindo fácil implementação em um microprocessador.

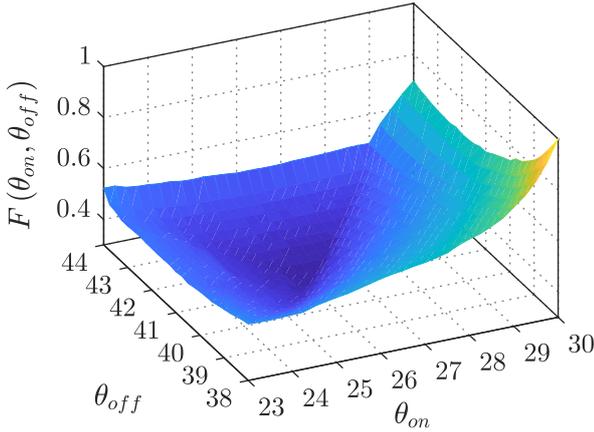


Figura 4. Resultado da otimização por varredura de parâmetros para uma velocidade de 60 rad/s.

3.2 Otimização por exame de partículas

O procedimento de otimização por exame de partículas proposto é apresentado na Figura 5. Novamente, utilizou-se o *software* Matlab/Simulink com os parâmetros de inicialização apresentados na Tabela 2. 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.

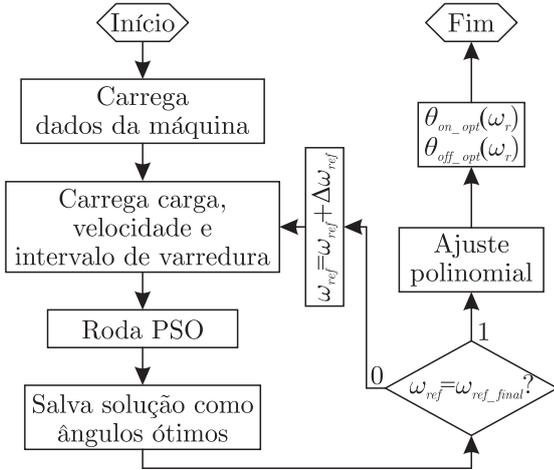


Figura 5. Procedimento proposto de otimização por exame de partículas.

Tabela 2. Parâmetros de inicialização da otimização por exame de partículas.

Parâmetro	Valor
Intervalo velocidade	[20,100] rad/s
Passo velocidade	20 rad/s
Intervalo θ_{on}	[23°,30°]
Intervalo θ_{off}	[38°,44°]
Número de partículas	5
Número de épocas	25
Coefficientes cognitivo e social	0.5
Carga	5 Nm

Inicialmente, os dados de magnetização do SRM são carregados, juntamente com os parâmetros de inicialização do PSO. Em seguida, os dados são enviados para o Simulink e o processo de simulação é iniciado. A ondulação de

torque é calculada para cada partícula e, caso a velocidade de referência não seja atingida, atribui-se um valor de $T_{ripple} = 1000$, indicando ao algoritmo que este resultado é indesejável. 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.

A Figura 6 mostra os resultados de simulação do algoritmo PSO em quatro épocas diferentes, para uma velocidade de 60 rad/s. Com a ajuda dos contornos da Figura 4, mostrados em segundo plano, é possível ver que o algoritmo converge para o mínimo da função, exatamente como o método de varredura de parâmetros, enquanto realiza significativamente menos simulações.

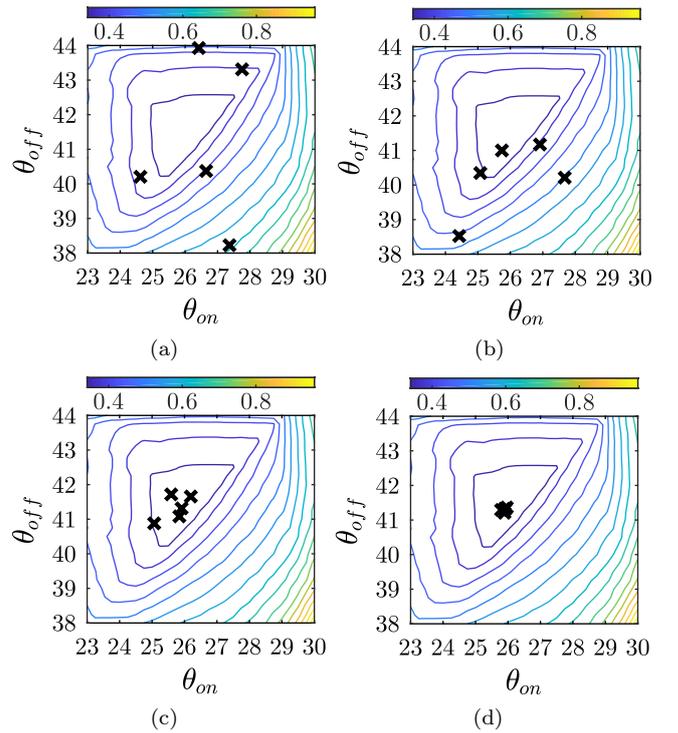


Figura 6. Resultado da otimização por exame de partículas para uma velocidade de 60 rad/s. (a) Época 1. (b) Época 10. (c) Época 18. (d) Época 25.

A evolução do melhor valor encontrado para a função custo ao longo das épocas é mostrada na Figura 7, mais uma vez evidenciando a convergência do algoritmo PSO.

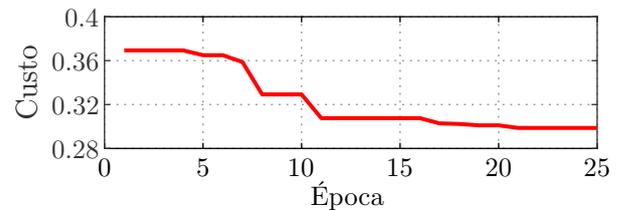


Figura 7. Melhor valor da função custo para cada época.

Novamente, o processo de simulação é repetido para todos os valores de velocidade e, ao fim do processo, é realizado um ajuste polinomial dos ângulos de disparo ótimos.

3.3 Comparação dos resultados

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados da otimização usando varredura de parâmetros e algoritmo PSO, respectivamente. Verifica-se que os parâmetros, embora próximos, apresentam valores diferentes. Avaliando-se o valor da função custo, entretanto, é evidente que o algoritmo PSO obteve resultados superiores em todas as velocidades, dado que valor da função custo em todos os pontos é menor. Somando-se a isso, o algoritmo PSO apresenta menor esforço computacional, uma vez que são executadas apenas 625 simulações no total (125 simulações por velocidade), enquanto a otimização por varredura de parâmetros faz uso de 3625 simulações (725 simulações por velocidade), representando uma redução de 82.8%.

Tabela 3. Resultados da otimização por varredura de parâmetros.

Varredura			
ω_r (rad/s)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	$F(\theta_{on}, \theta_{off})$
20	27.50	42.25	0.3976
40	26.50	41.50	0.3634
60	26.00	41.00	0.3006
80	26.00	41.00	0.2880
100	25.75	40.75	0.2807

Tabela 4. Resultados da otimização por enxame de partículas.

Enxame de partículas			
ω_r (rad/s)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	$F(\theta_{on}, \theta_{off})$
20	26.95	42.21	0.3965
40	26.45	41.53	0.3621
60	25.96	41.36	0.2958
80	25.75	40.99	0.2870
100	25.94	41.13	0.2774

Uma comparação entre as formas de onda de torque eletromagnético resultantes de ambos os procedimentos, para uma velocidade de 60 rad/s, é apresentada na Figura 8. Nota-se, mais uma vez, que o algoritmo PSO apresenta um resultado ligeiramente superior, enquanto apresentando um custo computacional significativamente menor.

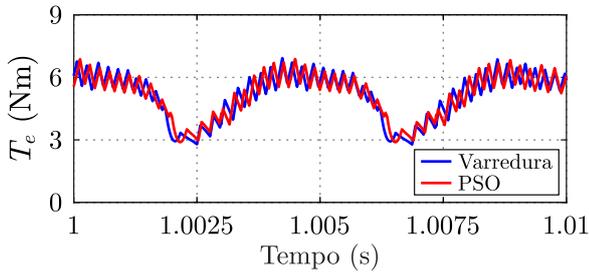


Figura 8. Comparação entre o resultado dos procedimentos de otimização a uma velocidade de 60 rad/s.

Os ângulos ótimos e os ajustes polinomiais realizados ao final das otimizações são mostrados na Figura 9. Nas equações (6) e (7) tem-se o resultado do ajuste por uma reta, para ambas as técnicas. Como mencionando anteriormente, os resultados do algoritmo PSO apresentaram custo menor aliado a menor complexidade computacional, assim, os resultados apresentados a seguir farão uso dos parâmetros ótimos obtidos por esta técnica.

$$\text{Varredura} \begin{cases} \theta_{on_opt}(\omega_r) = -0.0175\omega_r + 27.35 \\ \theta_{off_opt}(\omega_r) = -0.0175\omega_r + 42.35 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{PSO} \begin{cases} \theta_{on_opt}(\omega_r) = -0.0136\omega_r + 27.03 \\ \theta_{off_opt}(\omega_r) = -0.0135\omega_r + 42.25 \end{cases} \quad (7)$$

Na Figura 10 são apresentadas as formas de onda de torque eletromagnético e corrente na fase "a" para uma velocidade de 60 rad/s, para três casos distintos. No caso 1, tem-se $\theta_{on} = 30^\circ$ e $\theta_{off} = 38^\circ$, representando um intervalo curto de condução. No caso 2, tem-se $\theta_{on} = 22.5^\circ$ e $\theta_{off} = 37.5^\circ$, representando um intervalo de condução maior. O terceiro caso, dito ótimo, é obtido através das retas apresentadas em (7), resultantes do algoritmo PSO.

Verifica-se que a resposta com os ângulos de disparo ótimos, como esperado, apresenta a menor ondulação de torque. Somando-se a isso, verifica-se que estes parâmetros apresentam impacto também no rendimento da máquina, dado que alteram a forma de onda de corrente significativamente.

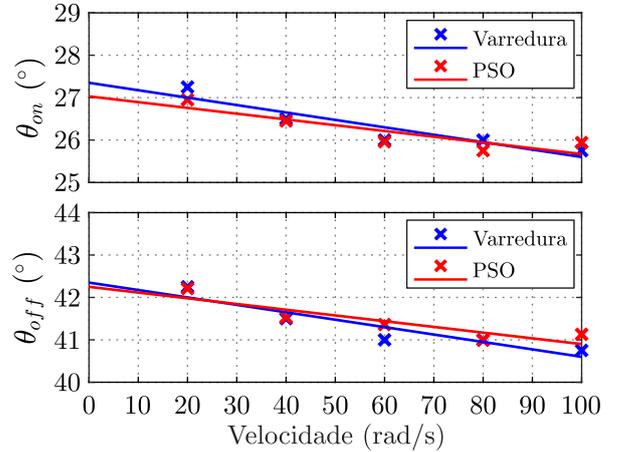


Figura 9. Resultados para a otimização por varredura, enxame de partículas e ajustes polinomiais.

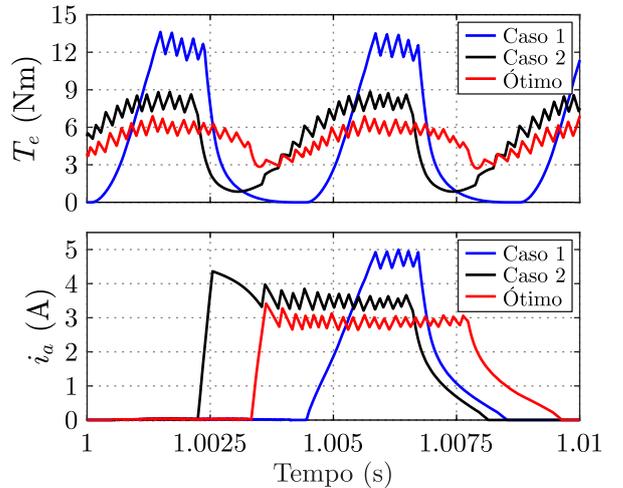


Figura 10. Resultados de simulação de torque eletromagnético e corrente para diferentes ângulos de disparo a uma velocidade de 60 rad/s.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Resultados de simulação em velocidade variável são apresentados a fim de validar a estratégia proposta. As características da máquina foram descritas na Seção 3, e a estrutura de controle utilizada é similar à apresentada na Figura 2, entretanto, agora fazendo uso das retas apresentadas na equação (7) para o cálculo dos ângulos de disparo em função da velocidade rotórica.

Na Figura 11 são apresentados os resultados para a resposta em malha fechada de um acionamento com velocidade variável, composta de duas rampas, seguidas por duas regiões de velocidade constante. Nota-se que o controlador é capaz de controlar de maneira satisfatória a velocidade do motor. Além disso, verifica-se que os ângulos de disparo são ajustados conforme a velocidade se altera, com o intuito de garantir que o motor opere com os parâmetros ótimos, garantindo reduzida oscilação de torque eletromagnético.

As formas de onda de torque e corrente para as velocidades de 40 rad/s e 80 rad/s são apresentadas na Figura 12. Verifica-se a redução na oscilação de conjugado, similar ao apresentado na Figura 10, comprovando a eficácia da estratégia de otimização proposta.

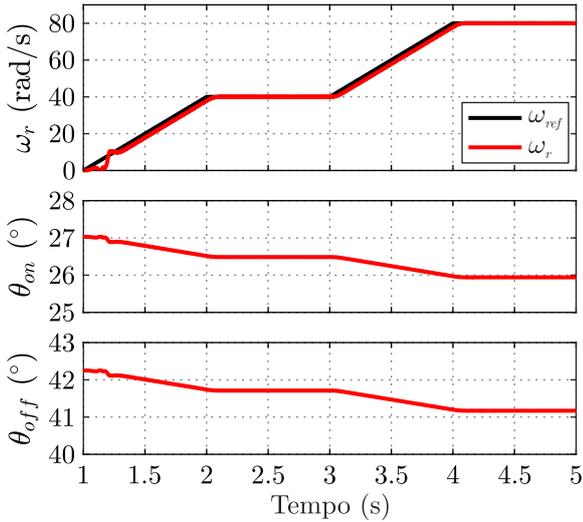


Figura 11. Resultado de simulação com velocidade variável utilizando parâmetros ótimos.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se uma estratégia para obtenção dos ângulos de disparo ótimos para um SRM baseado no algoritmo de otimização por enxame de partículas, a fim de minimizar ondulações de torque. As dificuldades a cerca da escolha destes parâmetros foram apresentadas, com foco na operação abaixo da velocidade base. Uma abordagem tradicional por varredura de parâmetros foi apresentada e, em seguida, a alternativa foi proposta, baseada no algoritmo PSO. Verificou-se que o algoritmo PSO é capaz de encontrar resultados com menor valor para a função custo em todas as velocidades, ou seja, com menor ondulação de torque. Somando-se a isso, o procedimento com PSO apresenta redução de esforço computacional de

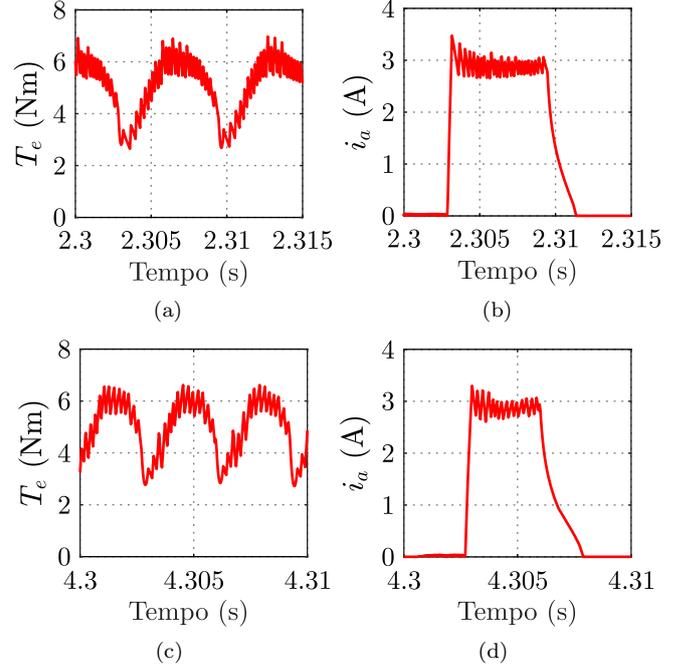


Figura 12. Resultado de simulação: detalhe das formas de onda. Velocidade de 40 rad/s: (a) Torque; (b) Corrente na fase “a”. Velocidade de 80 rad/s: (c) Torque; (d) Corrente na fase “a”.

82.8%, diminuindo significativamente o número de simulações realizadas. Resultados de simulação são apresentados, comparando os resultados ótimos com outros dois casos. Apresentou-se ainda um acionamento em velocidade variável, evidenciando a eficácia do método. Destaca-se que o procedimento pode ser estendido para diferentes objetivos sem prejuízo, através de diferentes funções custo.

REFERÊNCIAS

- Barros, T.A.D.S., Filho, P.S.N., Morreira, A.B., and Filho, E.R. (2016). Algoritmos para otimização do desempenho de geradores a relutância variável aplicados em geração eólica. *Revista Eletrônica de Potência*, 21(1), 32–41.
- Barros, T.A.D.S., Neto, P.J.D.S., Paula, M.V.D., Moreira, A.B., Filho, P.S.N., and Filho, E.R. (2018). Automatic characterization system of switched reluctance machines and nonlinear modeling by interpolation using smoothing splines. *IEEE Access*, 6, 26011–26021. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2825607.
- Bilgin, B. and Emadi, A. (2014). Electric motors in electrified transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system. *IEEE Power Electronics Magazine*, 1(2), 10–17.
- Bilgin, B., Howey, B., Callegaro, A.D., Liang, J., Kordic, M., Taylor, J., and Emadi, A. (2020). Making the case for switched reluctance motors for propulsion applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1–1.
- Bilgin, B., Jiang, J., and Emadi, A. (2019). *Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications*. CRC Press.
- Boldea, I., Tutelea, L.N., Parsa, L., and Dorrell, D. (2014). Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview. *IEEE Transacti-*

- ons on *Industrial Electronics*, 61(10), 5696–5711. doi:10.1109/TIE.2014.2301754.
- Fisch, J.H., Li, Y., Kjaer, P.C., Gribble, J.J., and Miller, T.J.E. (1997). Pareto-optimal firing angles for switched reluctance motor control. In *Second International Conference On Genetic Algorithms In Engineering Systems: Innovations And Applications*, 90–96.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, volume 4, 1942–1948 vol.4.
- Kioskeridis, I. and Mademlis, C. (2005). Maximum efficiency in single-pulse controlled switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4), 809–817.
- Krishnamurthy, M., Edrington, C.S., Emadi, A., Asadi, P., Ehsani, M., and Fahimi, B. (2006). Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(3), 659–675. doi:10.1109/TPEL.2006.872371.
- Li, H., Bilgin, B., and Emadi, A. (2019). An improved torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1635–1644.
- Mademlis, C. and Kioskeridis, I. (2003). Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(3), 448–457.
- Mademlis, C. and Kioskeridis, I. (2005). Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(3), 556–565.
- Neto, P.J.D.S., Barros, T.A.D.S., de Paula, M.V., de Souza, R.R., and Filho, E.R. (2018). Design of computational experiment for performance optimization of a switched reluctance generator in wind systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(1), 406–419. doi:10.1109/TEC.2017.2755590.
- Osório, C.R.D., Scalcon, F.P., Koch, G.G., Montagner, V.F., Vieira, R.P., and Gründling, H.A. (2020). Controle robusto aplicado a geradores de relutância variável conectados à rede. *Revista Eletrônica de Potência*, 25(3), 1–11. doi:10.18618/REP.2020.3.0015.
- Osório, C.R.D., Scalcon, F.P., Vieira, R.P., Montagner, V.F., and Gründling, H.A. (2019). Robust control of switched reluctance generator in connection with a grid-tied inverter. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–6. doi:10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065551.
- Scalcon, F.P., Osório, C.R.D., Koch, G.G., Gabbi, T.S., Vieira, R.P., Gründling, H.A., Oliveira, R.C.L.F., and Montagner, V.F. (2020). Robust control of synchronous reluctance motors by means of linear matrix inequalities. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1–1. doi:10.1109/TEC.2020.3028568.
- Scalcon, F.P., Vieira, R.P., and Gründling, H.A. (2018). Sliding mode speed control applied to the switched reluctance motor. In *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 695–700. doi:10.1109/IECON.2018.8591829.
- Staton, D.A., Miller, T.J.E., and Wood, S.E. (1993). Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, 140(4), 249–259. doi:10.1049/ip-b.1993.0031.