

Controle dos Ângulos de Comutação do Motor de Relutância Chaveada para Melhoria de Desempenho de Torque via Algoritmo Genético

Renata Rezende Reis* Marcio L. M. Kimpara* Raymundo C. Garcia* Gabriel Gentil**
Thyago Estrabis** João Onofre Pereira Pinto***

* Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, MS, Brasil
(e-mail: renatarezendereis@gmail.com
marcio.kimpara@ufms.br; raymundo.garcia@ufms.br)

** Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil
(e-mail: gabrielgentil@gmail.com; thyago.estrabis@gmail.com)

*** Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, EUA
(e-mail: pintoj@ornl.gov)

Resumo: O uso de Algoritmos Genéticos como ferramenta para a solução de problemas de otimização em engenharia tem se mostrado efetivo e de fácil implementação. Este artigo apresenta a otimização para os ângulos de chaveamento de um Motor de Relutância Chaveada 8/6 de 2,2 kW baseada na aplicação de Algoritmo Genético. O objetivo principal é reduzir uma conhecida desvantagem do MRC: o *ripple* de torque. Inicialmente, a máquina foi modelada em ambiente Matlab/Simulink a partir de *lookup tables* geradas por meio de simulação em elementos finitos. Dessa forma, baseado em um sistema de cossimulação, também implementado em Matlab/Simulink, o algoritmo retornou os ângulos de comutação otimizados que minimizaram o *ripple* do torque para o ponto de operação testado. Os resultados confirmaram que a performance de torque é sensível aos ângulos de comutação e, dessa forma, foi possível definir comandos de chaveamento que garantiram uma melhoria no desempenho de torque de até 53% quando comparados os resultados de ângulos não otimizados e otimizados para quatro pontos de operação diferentes.

Palavras-Chave: Máquina de Relutância Chaveada; Algoritmo Genético; Elementos Finitos; Otimização; *Ripple* de torque.

Abstract: The use of a Genetic Algorithm (GA) as a tool for the solution to engineering optimization problems has been proven to be effective and easy to implement. This paper presents a Genetic Algorithm-based optimization of the firing angles of a 2.2 kW 8/6 Switched Reluctance Machine aiming to reduce a well-known disadvantage of the SRMs: the torque ripple. Initially, the machine was modeled in Matlab/Simulink® by means of lookup tables obtained via finite element simulation. Thus, based on a co-simulation model also implemented in Matlab/Simulink®, the algorithm returned the optimized commutation angles of the phase excitation that minimize the SRM torque ripple for a chosen operation point. The results confirm that the torque performance of the SRM is sensitive to the commutation angles and, therefore, it was possible to define switching commands that improved the torque performance of the SRM drive up to 53% when comparing non-optimized and optimized angles for four different operating points.

Keywords: Switched Reluctance Motor; Genetic Algorithm; Finite Elements; Optimization; Torque Ripple.

1. INTRODUÇÃO

O motor de relutância chaveada (MRC) tem atraído a atenção da indústria ao redor do mundo. Atualmente, este motor vem sendo projetado e testado em diversos tipos de aplicação, incluindo as industriais, domésticas, espaciais e de mobilidade (Spampinato, A. et al., 2020, Honey, B. et al., 2020). Essa notoriedade é resultado de suas características competitivas frente a outros motores, como robustez, alta densidade de potência, ampla faixa de velocidade, baixo custo e eficiência elevada. Apesar das vantagens apresentadas pelo MRC, o

torque pulsante, elevado ruído audível e a necessidade de um *drive* sofisticado podem ser considerados fatores limitantes para a utilização deste tipo de motor em algumas aplicações (Lawrenson, P. et al., 1980). Há muitos aspectos a serem considerados na seleção do motor mais apropriado para determinada aplicação, logo, nos casos em que a carga é sensível à pulsação de torque, é necessário que o MRC e/ou seu sistema de acionamento passe por um processo de otimização (Krishnan, R., 2001).

Essencialmente, existem dois caminhos possíveis para desenvolver um projeto otimizado para o MRC: modificar a geometria da máquina a fim de garantir que sua estrutura

contribua para o desempenho esperado, ou otimizar o acionamento do motor, aplicando técnicas de controle que tornem o *drive* adequado para cumprir com os requisitos impostos pela carga (Reis, R. et al., 2021). Com o aumento do interesse da indústria na utilização do MRC, diversas abordagens de otimização foram propostas recentemente. Entretanto, o projeto otimizado de um motor elétrico se torna mais complexo à medida que diferentes aspectos são inseridos no pacote de restrições, como é o caso do projeto que contempla a análise multifísica da máquina, incluindo o estudo eletromagnético, estrutural mecânico e de transferência de calor. Dessa forma, a otimização via controle avançado para a redução das características adversas do MRC se torna preferível em alguns casos, especialmente quando a máquina já está construída.

Nesse sentido, muitas técnicas têm sido reportadas na literatura para a redução do *ripple* de torque através, por exemplo, da modificação da forma de onda da corrente de fase (Kimpara, M. et al., 2017). Além disso, em (Scalcon, F. et al., 2020) a técnica de enxame de partículas (PSO) foi utilizada para a definição dos ângulos de comutação. Embora os resultados sejam promissores, o PSO não apresenta operadores evolutivos, o que pode aumentar o número de iterações para obter um resultado satisfatório. Outra técnica de busca guiada que pode ser aplicada à otimização de máquinas elétricas é o Algoritmo Genético (AG). Em (Lai, C. et al., 2017) esta técnica foi aplicada para reduzir o *ripple* de torque em uma máquina de ímã permanente. Da mesma forma, em (Jiang, J. et al, 2015), o AG foi utilizado para comparar diferentes *designs* de um motor de relutância chaveada 24/16. Nesse caso, o *design* de melhor desempenho teve seus ângulos ótimos caracterizados, a partir de uma otimização multiobjetivo, para maximização do torque médio e minimização do *ripple* de torque em toda a faixa de velocidade de operação. Ainda, em trabalhos mais recentes, como (Haoding, L. et Al, 2019), o AG é utilizado para buscar, dentre diversos candidatos, o valor ótimo do parâmetro de peso que varia a corrente de excitação, imprimindo assim o menor *ripple* de torque possível dentro de uma rotina que inclui a técnica de Função de Compartilhamento de Torque (TSF).

Portanto, este artigo consiste na otimização dos ângulos de chaveamento de um Motor de Relutância Chaveada 8/6 de 2,2 kW baseada na aplicação do Algoritmo Genético, com o objetivo principal de suavizar o perfil de torque para a máquina operando abaixo da velocidade nominal. A eficácia do método proposto foi avaliada através de simulações.

2. A ORIGEM DO RIPPLE DE TORQUE

O motor de relutância chaveada apresenta estrutura duplamente saliente e, diferentemente dos motores clássicos, o rotor não apresenta nenhum tipo de enrolamento ou ímã permanente. O princípio de funcionamento do MRC baseia-se na tendência de alinhamento entre os polos do rotor e estator quando o enrolamento de fase é excitado. Dessa forma, o movimento contínuo no modo motor se dá com a excitação sequencial das fases do estator e conseqüentemente, o torque total é a soma do torque gerado devido à excitação da fase

anterior e da fase seguinte, que podem ser controladas de forma independente. Essa operação chaveada leva a um afundamento de torque que ocorre na região de comutação entre duas fases. Adicionalmente, conforme a expressão (1), o torque gerado T é proporcional à inclinação da indutância L , que por sua vez apresenta uma relação não linear com a posição do rotor θ , fazendo com que, mesmo diante de uma corrente de fase i constante, o torque gerado diminua à medida que os polos se aproximam do alinhamento completo. Esses dois fatores combinados, dão origem ao *ripple* de torque T_{ripple} , calculado pela expressão (2), a partir dos valores máximo ($T_{m\acute{a}x}$), mínimo ($T_{m\acute{i}n}$) e médio ($T_{m\acute{e}d\acute{i}o}$) do torque desenvolvido.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

$$T_{ripple} = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{T_{m\acute{e}d\acute{i}o}} \times 100\% \quad (2)$$

O sistema completo de acionamento do MRC é mostrado na Figura 1. Mais especificamente para o conversor, comumente, utiliza-se a topologia em ponte assimétrica, dada sua flexibilidade. Conforme mostra a Figura 2, este conversor requer duas chaves e dois diodos por braço e propicia o controle independente de todas as fases, portanto, a operação com sobreposição (comutação simultânea) entre fases é facilmente implementada (Krishnan, R., 2001). O chaveamento do conversor pode ocorrer de duas maneiras: unipolar, chamada também de *soft-switching*, e bipolar, ou *hard-switching*. No modo unipolar, adotado neste trabalho, entre θ_1 e θ_2 , na Figura 2, a chave S_1 é mantida ligada e S_2 recebe o comando de chaveamento de acordo com a referência da corrente elétrica, operando com controle por banda de histerese. No caso do chaveamento bipolar, ambas as chaves recebem o mesmo comando de controle, de acordo com a referência de corrente elétrica.

Os parâmetros envolvidos na implementação do controle são, comumente, o ângulo de disparo (θ_{on}) e ângulo de extinção (θ_{off}), que acabam por definir todo o período de chaveamento por fase, que inclui o instante de aplicação de corrente elétrica no enrolamento da fase, o tempo de comutação e o instante de desligamento. A amplitude da corrente elétrica pode ou não ser controlada, a depender da região de operação, ou seja, a abordagem do controle depende da velocidade de operação do MRC, sendo necessário aplicar diferentes estratégias de chaveamento quando o sistema de acionamento opera em velocidade variável (Moallem, M. 1989). Em baixas velocidades, a taxa de crescimento da corrente elétrica (que é dependente da amplitude da tensão elétrica eletromotriz induzida) é alta, o que implica na necessidade de limitar a amplitude da corrente elétrica, utilizando por exemplo, o controle por banda de histerese. Por outro lado, em altas velocidades, a tensão elétrica contra eletromotriz induzida se torna dominante e não é necessário limitar o valor máximo da corrente elétrica. A Figura 3 apresenta a relação entre a posição dos dentes do estator e rotor, a indutância e a corrente elétrica de fase, para altas e baixas velocidades. Neste trabalho, serão analisados pontos de operação abaixo da velocidade nominal.

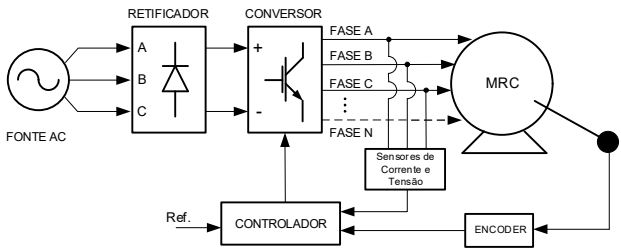


Fig. 1 Sistema de acionamento do MRC.

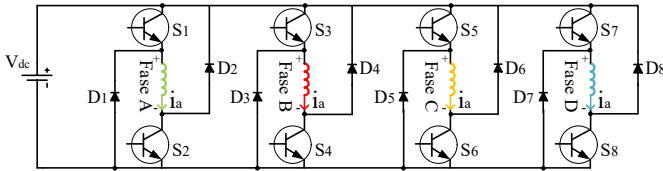


Fig. 2 Conversor Ponte assimétrica.

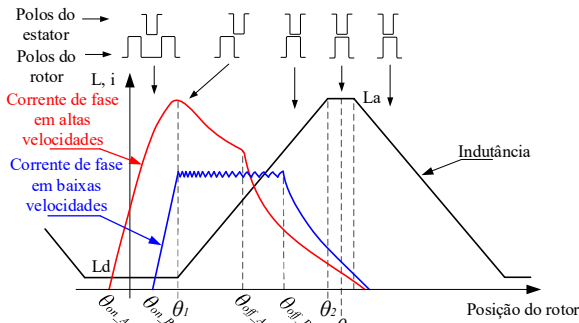


Fig. 3 Padrões de acionamento do MRC.

2.1 Efeito dos Ângulos de Comutação

Os ângulos de excitação das fases, que definem o período de comutação, podem ser utilizados como ferramentas para maximizar o desempenho do MRC (Shahabi, A. 2013). A Figura 4 apresenta três perfis de excitação que evidenciam os efeitos dos ângulos de comutação na geração de torque. O perfil 1 apresenta um curto período de excitação, resultando em um valor menor, tanto de corrente RMS quanto de perdas ôhmicas. Contudo, esse perfil de excitação dá origem a um torque de baixa qualidade, uma vez que seu valor médio é reduzido e existe maior *ripple*, dado o grande período de tempo até que a próxima fase seja excitada. Já nos perfis 2 e 3, o período de comutação é maior, melhorando assim a qualidade do torque gerado. Outro efeito visível nos dois últimos perfis é a geração de torque negativo dado o atraso no desligamento da excitação da fase. Esse efeito é causado pela invasão de corrente elétrica à região de derivada negativa da indutância, ou seja, após o completo alinhamento dos polos. Vale ressaltar que algum torque negativo de fase pode ser tolerado em benefício do torque total gerado no eixo do MRC.

3. METODOLOGIA

Modificar os ângulos de comutação afeta o torque médio de saída, a eficiência e a oscilação de torque do MRC. Buscar

pelos valores ótimos para estes parâmetros de controle pode ser um trabalho de alto consumo de tempo se feito manualmente, e por isso, técnicas de otimização podem ser empregadas para acelerar esse processo. Como os valores de ângulos de comutação ótimos podem depender da velocidade, o processo de otimização deve ser realizado por ponto de operação, de modo que a velocidade de rotação se mantenha constante durante a otimização de cada ponto. A Figura 5 apresenta o diagrama proposto para a otimização dos ângulos de comutação a partir de uma cossimulação envolvendo um *script* com o algoritmo do AG e um modelo em Simulink baseado em tabelas que caracterizam o motor utilizado.

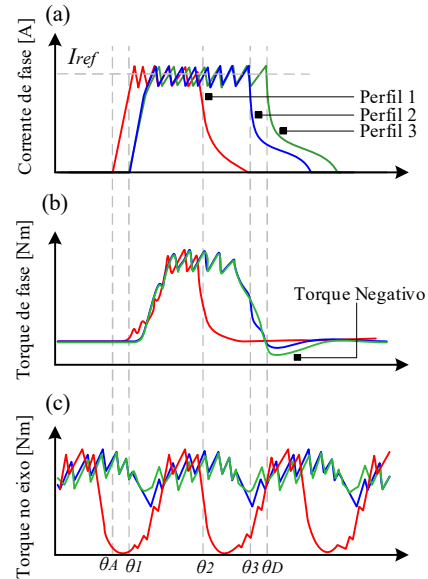


Fig. 4 Perfis de corrente e torque resultante.

Conforme o diagrama, θ_{on} e θ_{off} são os ângulos relativos em que cada fase é energizada e desenergizada, respectivamente. O ponto de operação é definido pela velocidade (ω_{ref}) e pela corrente elétrica de referência (I_{ref}). As restrições são formadas pela corrente elétrica RMS máxima permitida (I_{rms}) e pela região de busca dos ângulos (θ_{range}).

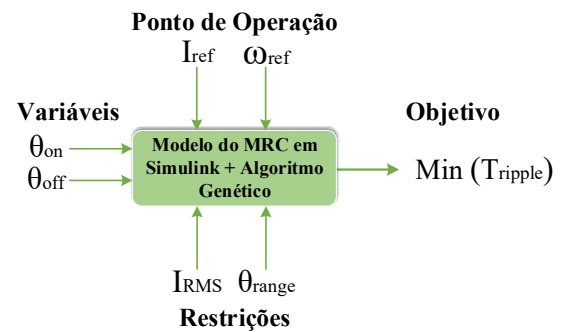


Fig. 5 Definição do problema de otimização.

3.1 Caracterização inicial do modelo: Simulação em Elementos Finitos

O modelo implementado em Simulink, utiliza tanto as tabelas de torque e fluxo que caracterizam o motor, quanto equações

analíticas que modelam o acionamento, o que o torna menos custoso computacionalmente, característica desejável para aplicação em um método iterativo de busca. As tabelas supracitadas foram levantadas a partir de simulações no *software* FEMM para diversos valores de corrente elétrica e posição do rotor. Esses perfis são comumente utilizados na modelagem de máquinas de relutância, uma vez que a alta não linearidade dos parâmetros impede que um modelo acurado seja desenvolvido baseado apenas em equações lineares. Os parâmetros do MRC utilizado nesta pesquisa estão listados na Tabela 1 e a Figura 6 apresenta o motor em questão, cujas dimensões reais foram utilizadas para construir o modelo em elementos finitos. Os resultados obtidos para o fluxo e torque são mostrados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros do MRC

Parâmetro	Valor
Potência	2,2 kW
Velocidade base	3.500 rpm
Tensão elétrica	180 V ou 311 V*
Corrente elétrica RMS	6 A
Número de polos do rotor	6 un.
Número de polos do estator	8 un.
Material das Laminacões	E185

* A depender da conexão das bobinas (paralelo ou série).

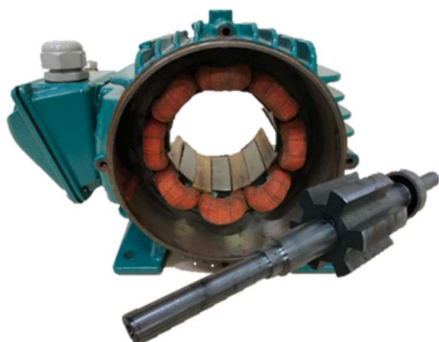


Fig.6 MRC utilizado no estudo.

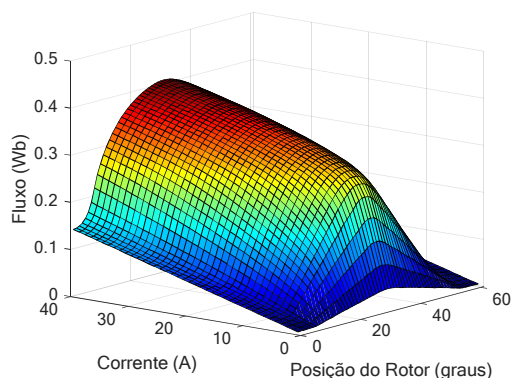


Fig. 7 Perfil de fluxo do MRC modelado.

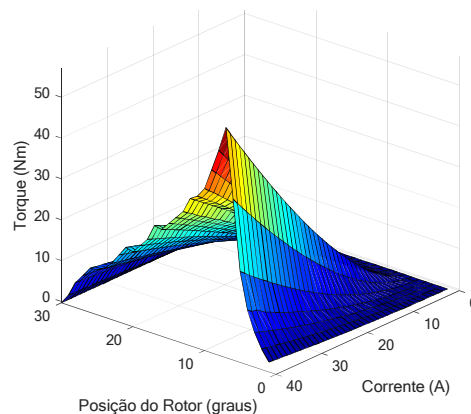


Fig. 8 Perfil de torque do MRC modelado.

3.2 Otimização dos ângulos de condução a partir de Algoritmos Genéticos

Fica claro, a partir dos perfis de funcionamento do MRC, que para maximizar o desempenho de torque, θ_{on} deve ser alocado próximo à região de mínima indutância para que a corrente elétrica atinja um nível de amplitude que melhor aproveite o início da derivada positiva da indutância para geração de torque. Já θ_{off} deve estar no entorno da máxima indutância, para que a corrente elétrica tenha tempo de decair sem causar uma geração excessiva de torque negativo. O objetivo principal é minimizar a oscilação de torque para um ponto de operação definido pela velocidade e a corrente elétrica RMS máxima, com a busca estabelecida em uma faixa de possíveis valores de ângulos de comutação, conforme estabelece a expressão (3), onde T_{ripple} representa o valor da oscilação do torque gerada pelo MRC, I_{rms} é a corrente elétrica RMS de fase e os valores de θ_{sup} e θ_{inf} são os valores superior e inferior para a busca dos ângulos ótimos (Eq. 4), dada uma velocidade constante ω_{ref} , que define o ponto de operação em conjunto com a corrente de referência.

$$\mathbb{F} = \begin{cases} I_{rms} \leq \max(I_{rms}) \\ \min(T_{ripple}), \theta_{on_inf} \geq \theta_{on} \leq \theta_{on_sup} \\ \theta_{off_inf} \geq \theta_{off} \leq \theta_{off_sup} \\ \omega_{ref} = \text{constante} \end{cases} \quad (3)$$

Todo o processo de otimização foi desenvolvido em ambiente Matlab/Simulink®, a partir da utilização do *Global Optimization Toolbox*, inicializado a partir de linhas de comando. As configurações do algoritmo genético implementado são descritas a seguir:

- Tamanho da população: 5;
- Número máximo de gerações: 10;
- Manutenção de Elite: 1 indivíduo;
- Método de seleção: roleta;
- Região de busca: definida em graus elétricos, variando θ_{on} de 0 a 60 graus e θ_{off} de 90 a 180 graus.
- Função fitness: Foi utilizada a equação de oscilação percentual de torque, mostrada na expressão (2).

O tamanho da população e o número máximo de gerações foram definidos com base em testes preliminares, optando-se

por utilizar valores que retornassem uma boa convergência com baixo custo computacional, dado que a cada iteração, é necessário avaliar a função custo para cada indivíduo gerado. A fim de confirmar que uma população maior não era necessária para a solução deste problema específico, os ângulos gerados em cada população tiveram seus valores acrescidos de um incremento de ângulo ($\pm\Delta\theta$). Na análise dos resultados, não foram observadas variações expressivas que justificassem um maior número de indivíduos para cobrir de maneira mais efetiva a região de busca. Nesse sentido, caso a solução de determinado tipo de problema exija uma análise mais profunda da sensibilidade da região de busca em relação à discretização desse espaço, uma alternativa é implementar o método de busca exaustiva, que realiza tal atividade, a um custo computacional maior.

Durante o processo de otimização, os pares de ângulos gerados pelo AG foram enviados à simulação em ambiente Simulink, gerando assim as respostas de torque e a corrente elétrica de referência originada pelo controle de velocidade. Esses resultados foram avaliados pelo algoritmo de otimização através do cálculo da função *fitness*. Uma vez atingidos os objetivos, os dados foram salvos em uma *lookup table* que relaciona o ponto de operação e os ângulos ótimos. A Figura 9 apresenta o fluxograma do método proposto.

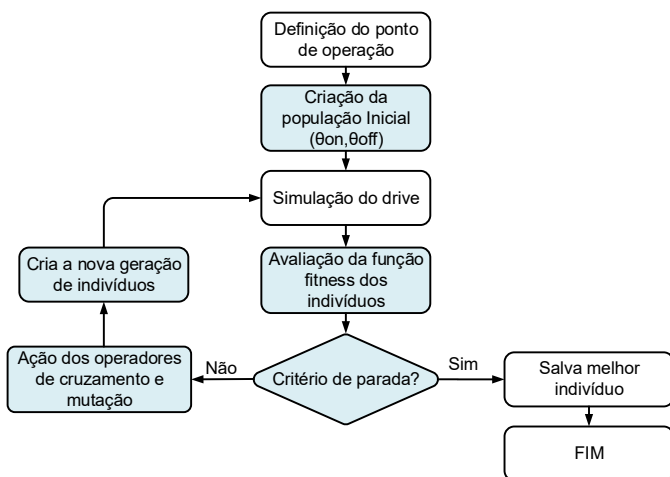


Fig. 9 Procedimento de otimização.

4. RESULTADOS

Os passos apresentados no fluxograma da Figura 9 foram cumpridos para 4 pontos de operação definidos, a saber 160, 200, 360 e 600 rpm. A Figura 10 mostra o resultado de convergência e os indivíduos gerados para θ_{on} e θ_{off} durante a busca realizada para a velocidade de 160 rpm. Para os outros pontos de simulação, os resultados foram obtidos de maneira semelhante. Observa-se que com o avanço das gerações, novos indivíduos são gerados a partir dos operadores de cruzamento e mutação, fazendo com que a evolução nesses indivíduos gere um melhor resultado na função custo. Logo, a partir da 7ª geração o método de busca converge, uma vez que a partir dessa geração o valor da função custo não apresenta variação, se mantendo em torno de 93%. Além disso, os gráficos que mostram a população de ângulos indicam a dispersão dos

indivíduos gerados e os resultados ótimos se mostram por meio da concentração de indivíduos em torno de, neste caso, 15° elétricos para θ_{on} e 120° para θ_{off} . A Tabela 2 apresenta os resultados do método de busca para todos os pontos de operação testados, cuja execução foi realizada mais de uma vez, visando evitar mínimos locais. O tempo de execução total, em média, é de 130 segundos em para um processador Intel i5 3317U @1.7GHz.

A fim de verificar a melhoria percentual em relação ao acionamento convencional, os resultados de simulação foram confrontados. Salienta-se que, segundo (Sashankh, R. 2016), o acionamento convencional significa acionar o MRC durante 1 ciclo de produção de torque, que no caso de uma máquina 8/6, vale 15° mecânicos. Ainda, para o acionamento convencional, θ_{on} deve estar alocado na posição de completo desalinhamento. A Figuras 11 (a) ilustra o resultado da comparação entre o torque gerado pela excitação que utiliza ângulos de comutação não otimizados e aqueles obtidos pelo processo de otimização. Para este ponto de operação específico foi observada uma redução de 48% no fator de *ripple*. Adicionalmente, a Figura 11 (b) mostra que tal redução é obtida com a sobreposição das correntes de fase. Os resultados comparativos para os demais pontos mostrados na Tabela 2, estão ilustrados nas Figuras 12, 13 e 14. Nota-se que todos os pontos testados apresentam redução na oscilação de torque e o ponto de operação de 200 rpm apresentou a maior redução percentual.

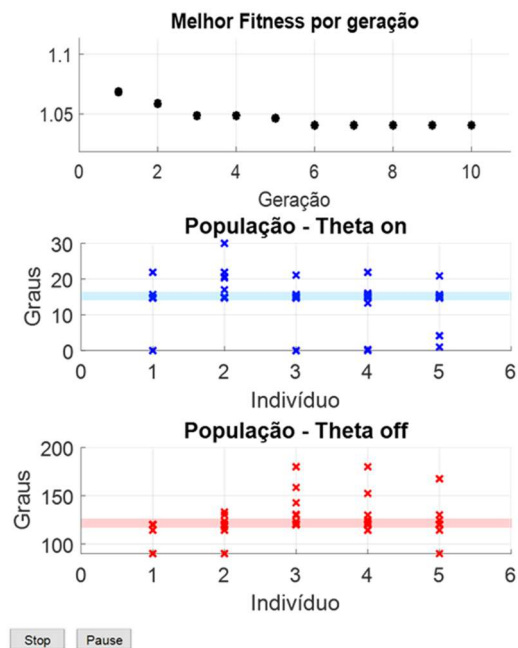


Fig. 10 Resultado de Simulação para 160 rpm.

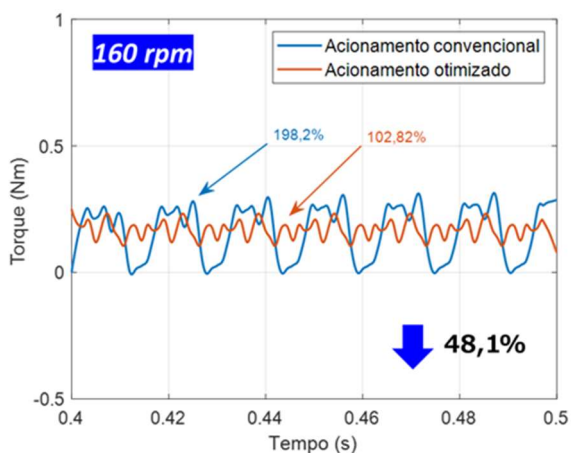
A aferição do torque médio é uma importante métrica para avaliar a qualidade dos ângulos encontrados pelo AG, pois em uma aplicação prática, é desejável que o motor continue a atender a carga mesmo com a variação dos ângulos de controle. Os valores de torque médio calculados para cada ponto estão reunidos na Tabela 3. A maior variação no torque médio observada foi de 5,5%. Essa pequena variação pode ser

tolerada em benefício do desempenho geral de torque, uma vez que a oscilação no conjugado foi reduzida.

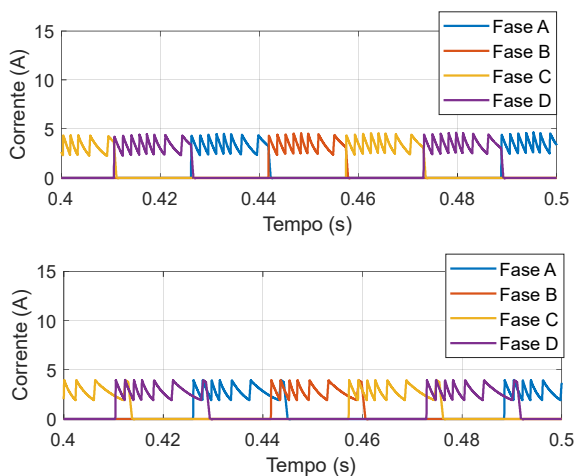
Ainda, há de se considerar que a busca implementada não é do tipo multiobjetivo, uma vez que a redução do *ripple* de torque é a única função custo. Além da verificação do torque médio,

Tabela 2. Ângulos otimizados

Velocidade	Parâmetro	Graus elétricos
160 rpm	θ_{on} otimizado	15
	θ_{off} otimizado	120
	$\theta_{dwell} = (\theta_{on} - \theta_{off})$	105
200 rpm	θ_{on} otimizado	9
	θ_{off} otimizado	117
	$\theta_{dwell} = (\theta_{on} - \theta_{off})$	108
360 rpm	θ_{on} otimizado	6
	θ_{off} otimizado	98
	$\theta_{dwell} = (\theta_{on} - \theta_{off})$	92
600 rpm	θ_{on} otimizado	7,5
	θ_{off} otimizado	104
	$\theta_{dwell} = (\theta_{on} - \theta_{off})$	96,5



(a)



(b)

Fig. 11 Resultado de Simulação para 160 rpm. (a) Perfil de Torque; (b) Corrente convencional vs. otimizada.

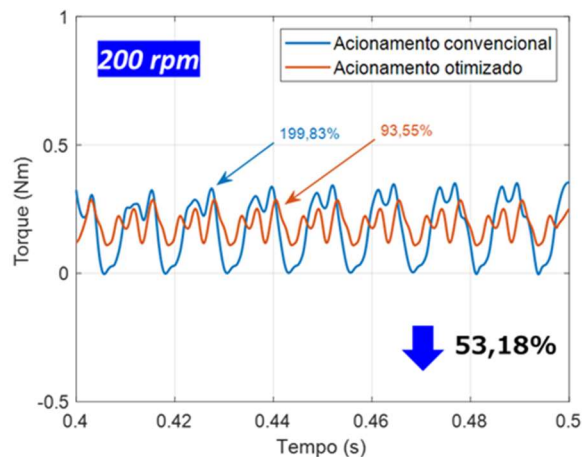


Fig. 12 Resultado de Simulação para 200 rpm.

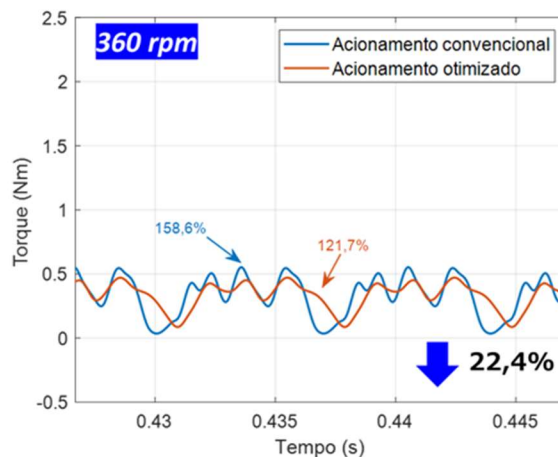


Fig. 13 Resultado de Simulação para 360 rpm.

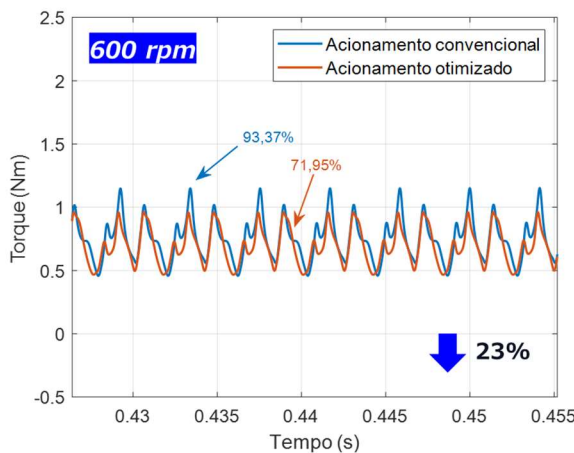


Fig. 14 Resultado de Simulação para 600 rpm.

a corrente elétrica de referência também pode ser utilizada como parâmetro de avaliação. Para todos os 4 pontos de

operação testados, a corrente do ponto otimizado é ligeiramente menor que a do ponto operando sob acionamento convencional. Esse fato sugere que as perdas podem ser menores caso os ângulos ótimos sejam utilizados.

A faixa de operação testada no AG foi definida visando testes experimentais futuros considerando as limitações da bancada de acionamento. Contudo, o método pode ser facilmente aplicado à toda faixa de velocidade obtendo desempenho similares aos apresentados.

Tabela 3. Resultados de simulação: acionamento convencional vs. Ótimo.

Velocidade	Parâmetro	Convencional	Ótimo
160 rpm	$T_{médio}$	0,167 N.m	0,167 N.m
	I_{ref}	3,6 A	3,5 A
200 rpm	$T_{médio}$	0,18 N.m	0,17 N.m
	I_{ref}	3,5 A	3,0 A
360 rpm	$T_{médio}$	0,334 N.m	0,331 N.m
	$T_{médio}$	4,3 A	4,1 A
600 rpm	$T_{médio}$	0,75 N.m	0,71 N.m
	I_{ref}	8,0 A	7,5 A

6. CONCLUSÕES

O problema da pulsação de torque na máquina de relutância chaveada se deve, em parte, à natureza sequencial de excitação das fases para produzir o movimento rotativo. Neste artigo, este problema foi abordado utilizando algoritmo genético para obter ângulos ótimos de comutação das fases visando um perfil de torque mais suave. Apesar da existência de outras técnicas para esta mesma finalidade, os resultados de simulação demonstraram que o algoritmo proposto foi eficiente na busca pelos ângulos ótimos, apresentando rápida convergência. Foram analisados 4 pontos de operação, obtendo-se percentuais de redução diferentes dada a característica não linear da máquina. A sequência do trabalho consiste na generalização dos ângulos de comutação para toda a faixa de operação do motor.

7. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo 429543/2016-6.

REFERÊNCIAS

Lawreson, P. J. et al., (1980). Variable-speed switched reluctance motor. *IEEE Proceedings B-Electric Power Applications*. 127(4), 253-265.
Honey, B., Bilgin, B., Emadi, A., (2020). Design of an external-rotor direct drive E-bike switched reluctance

motor. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 69(3), 2552–2562.

Spampinato, A., Forte, G., Scelba, G and De Donato, G., (2020). A Cost-Effective Switched Reluctance Motor Drive for Vacuum Cleaners. *in Proc. SPEEDAM, Sorrento*, 36-41.

Krishnan, R. (2001). Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications. *CRC Press LLC*.

Reis, R., Kimpara, M., Pinto, J., Fahimi, B. (2021). Multy-Physics Simulations of 6/4 Switched Reluctance Motor by Finite Element Method, *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, 26(1), 9-18.

Kimpara, M., et al. (2017). Improvement in Torque Profile of Switched Reluctance Motors. *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 309-314.

Scalcon, F., Gabbi, T., Vieira, R., Grundling, H. (2020). Melhoria de Desempenho de Motores de Relutância Variável Via Algoritmo de Enxame de Partículas. *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, 25(4), 492-502.

Jiang, J. W, Bilgin, B., Emadi, A. (2015). Design optimization of switched reluctance machine using genetic algorithm. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1671-1677.

Haoding, L., Bilgin, B., Emadi, A (2019). 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.

Lai, C., Feng, G., Iyer, K. L. V., Mukherjee, K. and Kar, N. C. (2017). Genetic Algorithm-Based Current Optimization for Torque Ripple Reduction of Interior PMSMs. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 53(5), 4493-4503.

Moallem, M. (1989). Performance Characteristics of Switched Reluctance Motor Drive. *Doctoral Theses Purdue University*.

Shahabi, A., Rashidi, A. and Saghayan-Nejad, S. M. (2013). Torque Ripple Reduction of SRM Drives Below the Base Speed Using Commutation Angles Control. *21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1-6.

Sashankh, R. (2016). Multi-Objective Optimization of the Switched Reluctance Motor for Improved Performance in a Heavy Hybrid Electric Vehicle Application. *Open Access Theses*.