

## ESTUDO DE DESEMPENHO DE MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA EM APLICAÇÕES VEICULARES.

**Paulo H. A. S. e Silva (EG), Marcos A. A. de Freitas (PQ), Josemar A. S. Júnior (PQ),  
Matheus M. Cabral (EG), Ghunter P. Viajante (PQ).**

Instituto Federal de Goiás- Câmpus Itumbiara  
Departamento de áreas acadêmicas- Núcleo de Pesquisa em Sistemas de Energia (NuPSE).

**Área do Conhecimento: Máquinas elétricas e dispositivos de potência.**

### Resumo

*A preocupação com a escassez dos recursos naturais e redução dos níveis de emissão de gases poluentes têm modificado a dinâmica de produção dos setores automobilísticos. Nesse contexto, os veículos elétricos surgem como alternativa para os veículos à combustão e redução de gases poluentes ao meio ambiente. Neste propósito, este artigo apresenta o estudo de desempenho dinâmico do Motor Síncrono de Relutância (MSR) em aplicações veiculares através de simulação computacional. Os resultados são avaliados a partir do desempenho do motor para dois cenários de aplicação, comumente verificados em aplicações veiculares, verificando os níveis de corrente, conjugado e perfil de velocidade para ensaio a vazio com degrau de velocidade e com inserção de carga no eixo do motor com velocidade constante.*

**Palavras-chave:** Motor Síncrono de Relutância; Simulação computacional; Veículos elétricos.

### Introdução

O interesse em reduzir a emissão de gases poluentes têm diversificado a forma de produzir tecnologia. Sob essa perspectiva, os setores industriais, sobretudo automobilístico, alteram, gradualmente, as tecnologias desenvolvidas, a fim de mitigar ou reduzir os impactos danosos ao meio ambiente devido a queima de combustíveis fósseis ou utilização de recursos esgotáveis para promoção de novos produtos de mercado. Esta preocupação tornou-se evidente a partir da conferência de Estocolmo e, anos depois, protocolo de Kyoto (MOREIRA. et al., 2008). Frente a este cenário, as principais propostas para reversão do quadro produtivo de tecnologia tem sido: 1) Investimento em transportes alternativos aos veículos à combustão; 2) Melhoria da qualidade dos carros à combustão; 3) investimentos em veículos elétricos e híbridos. Frente a estas mudanças no setor automobilístico, os Motores Síncronos de Relutância (MSR) surgem como alternativa às mudanças produtivas nos setores automotivos, devido alta eficiência e desempenho de conjugado (AMARA. et al., 2009).

Os primeiros modelos de motores síncronos de relutância foram criados a partir século XX. Embora essas máquinas tenham surgido como alternativa para as máquinas assíncronas, os motores síncronos a relutância (MSR) tiveram seu uso intensificado apenas após o desenvolvimento da eletrônica de potência e dos sistemas microprocessados de alto desempenho e baixo custo (ABB, 2019). A partir daí os MSR's foram, gradualmente, inseridos nos meios de produção industrial. Essa inserção deve-se principalmente aos baixos custos construtivos e operacionais deste motor. Além disso, a possibilidade de aplicação em grandes valores de velocidade (1800 rpm), com controle de velocidade relativamente simples e elevada densidade de conjugado, tornam este motor factível aos setores industriais. A construção dos MSR's torna-se particulares devido as características construtivas dos rotores, que são formados por chapas laminadas, e variam em relação a quantidade e formato das ranhuras presentes em cada tipo de rotor. Neste trabalho, portanto, a análise desempenho do Motor Síncrono de Relutância em

aplicações veiculares através de dois cenários de aplicação, utilizando simulação computacional. Finalmente, os resultados o perfil de velocidade, conjugado e correntes do motor são apresentados e considerações são realizadas.

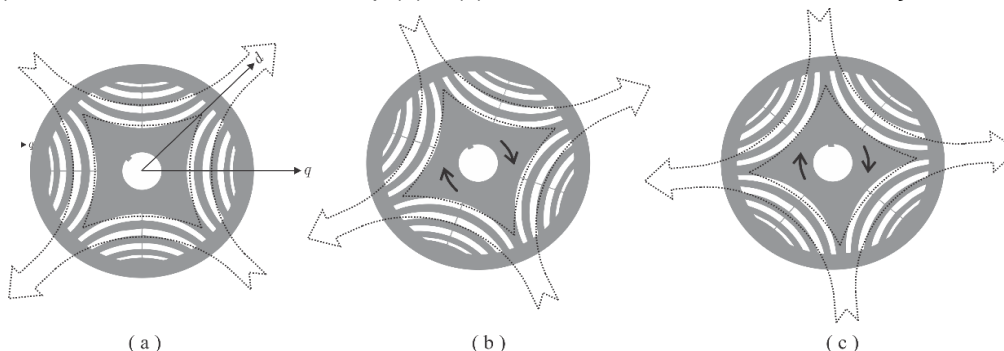
## Material e Métodos

A metodologia empreendida neste trabalho apresenta o princípio de funcionamento do MSR, modelo matemático seguido da estrutura de simulação, como segue:

### 1. Princípio de funcionamento do Motor Síncrono de Relutância

O MSR é construtivamente simples devido as semelhanças com outras máquinas elétricas difundidas no mercado, pois o estator deste é semelhante ao de máquinas assíncronas. O rotor, por sua vez, dispensa enrolamentos elétricos em sua construção. Esta característica construtiva torna esse motor capaz de operar em níveis elevados de corrente com níveis menores de temperatura, se comparado ao Motor de Indução Trifásico (MIT) (BOGLIETTI, A. et al., 2006). Além disso, a inércia torna-se menor e as perdas por dissipação de energia no rotor inexistentes, possibilitando, dessa maneira, modelos de máquinas elétricas simplificadas e mais eficientes, devido à redução de perdas por efeito joule e rotacionais (BOLDEA, I. et al., 2014). O princípio de funcionamento do MSR é baseado a partir da diferença entre relutância dos eixos direto e quadratura. A Figura 1 indica o sentido de escoamento do fluxo magnético, em que o eixo d representa o sentido do fluxo e o eixo q o eixo de maior relutância, devido a presença de barreiras de ar.

**Figura 1** - (a) Sentido do fluxo nos eixos d-q; (b) e (c) Sentido do fluxo do motor em rotação.



Fonte: Adaptado de (SCALCON, 2019).

### 2. MODELO MATEMÁTICO DO MSR NO SISTEMA DE EIXO DIRETO E EM QUADRATURA (D-Q).

O modelo matemático desenvolvido do MSR baseia-se no sistema de coordenadas d-q, este, por sua vez, é bifásico, estacionário no tempo e defasado de 90°. Outros sistemas de coordenadas como  $\alpha\beta$  também podem ser utilizados, no entanto são desconsiderados neste trabalho devido a maior exigência de parâmetros (LEE, C. H., 1959). Para modelagem matemática foram desconsiderados alguns fenômenos do motor como:

- 1) *Perdas no ferro;*
- 2) *Efeitos de saturação magnética cruzada;*
- 3) *Componentes harmônicas oriundas do inversor escalar Pulse Width Modulation (PWM).*

A tensão do estator d-q é apresentada nas equações 1 e 2:

$$V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_d \quad (2)$$

As equações 1 e 2 representam as tensões estatóricas. Em que  $R_s$  é a resistência do enrolamento do estator,  $\Psi$  é o fluxo magnético e  $\omega_e$  a velocidade angular elétrica do rotor. A relação entre a velocidade angular elétrica do rotor e a velocidade mecânica do motor é apresentada pela equação (3):

$$\omega_e = p \cdot \Omega_m \quad (3)$$

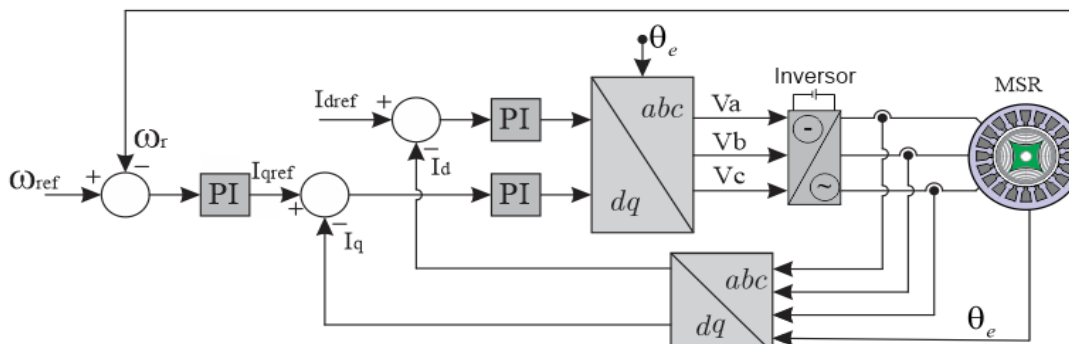
Onde  $p$  representa os pares de polos do motor e  $\omega_m$  a velocidade mecânica da máquina. O conjugado eletromagnético do motor está relacionado a diferença entre as indutâncias d-q. Este, por sua vez, depende dos valores das indutâncias do estator como exposto na equação (4):

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \quad (4)$$

### 3. Estrutura de Simulação computacional do MSR

O acionamento do MSR é possibilitado através de alimentação trifásica com auxílio do inversor de frequência. O uso do inversor é justificado pela necessidade de partida suave do motor. Para implementação computacional, as resistências dos enrolamentos do estator são consideradas iguais e defasadas espacialmente em  $120^\circ$  (KRAUSE, et al., 2002). Por fim, a corrente é controlada a partir da posição do rotor, utilizando o mecanismo de transformação dq0. A estrutura de simulação é apresentada na Figura 2.

**Figura 2** - (a) Sentido do fluxo nos eixos d-q; (b) e (c) Sentido do fluxo do motor em rotação.



Fonte: Próprio autor.

Onde  $\theta_e$  representa a posição do rotor ou ângulo de defasagem da rede. A estratégia de mudança de eixos de coordenadas abc para d-q é justificada para reduzir os esforços em modelagem matemáticas, projeto de controladores e implementação computacional. O projeto dos controladores PI de velocidade e corrente baseiam-se conforme aborda (SCALCON, 2019).

## Resultados e Discussão ou Relato de Caso

A análise do MSR aplicado em veículos elétricos é realizada a partir de dois cenários de aplicação, considerando a vazio e com inserção de carga. A indutância utilizada para simulação é considerada constante, embora apresente pequenas variações em regime permanente (LIU, Y. et al., 2018). Para realização da simulação computacional foram utilizados os seguintes parâmetros, presentes na Tabela 1.

**Tabela 1**- Parâmetros do MSR para simulação.

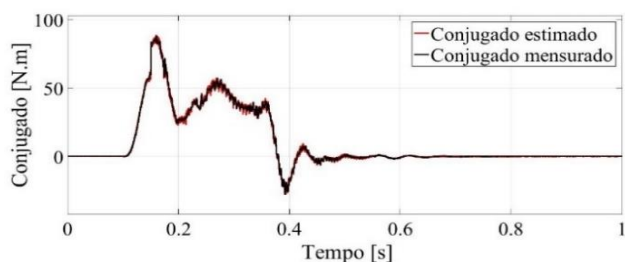
Especificações	Valores
Conjugado de saída	40 N.m
Tensão Nominal	380 V
Frequência	60 Hz
Pares de polos	2
Velocidade nominal	1800 rpm
Parâmetros	
Indutância $L_d$	3,58 [mH]
Indutância $L_q$	1,85 [mH]
Resistencia do estator ( $R_s$ )	4,25 $\Omega$

Fonte: Próprio autor.

## 1. Cenário 1

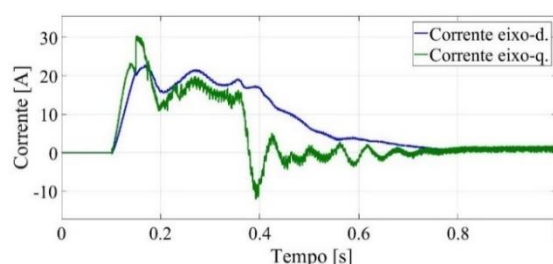
Neste estudo de caso, o motor foi simulado sem carga acoplado ao eixo. O conjugado, correntes e perfil de velocidade são apresentados nas Figuras (3), (4) e (5).

**Figura 3** - Conjugado do MSR a vazio.



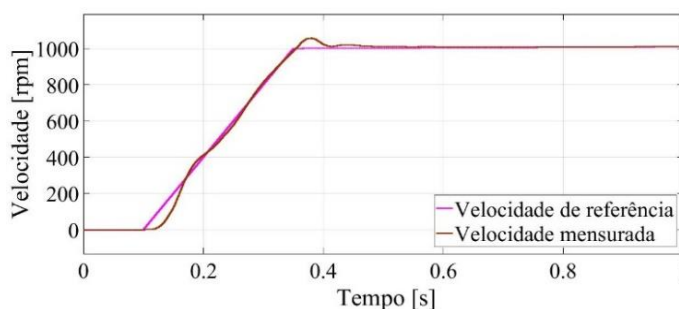
Fonte: Próprio autor.

**Figura 4** - Correntes d-q do MSR a vazio.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 3** - Velocidade do MSR a vazio.



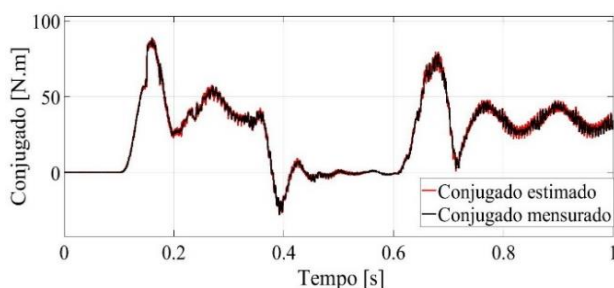
Fonte: Próprio autor.

Os resultados mostraram que para aumento de velocidade do motor o conjugado foi modificado e as correntes d-q acompanharam atenderam ao degrau de velocidade. A partir do instante 0,4 segundos o conjugado é nulo, pois opera a vazio.

## 2. Cenário 2

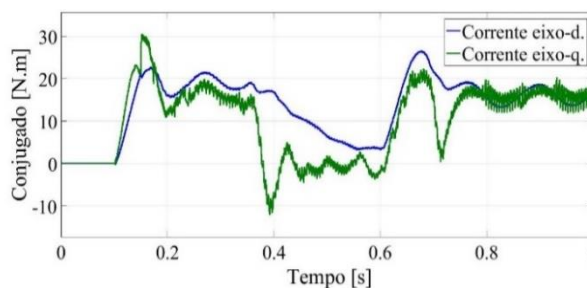
Neste cenário de aplicação, o MSR foi simulado inicialmente com a vazio e no instante 0,6 segundos foi inserido carga conectada ao eixo. O conjugado exigido pela carga é de 40 N.m.

**Figura 4** - Conjugado do MSR com carga.



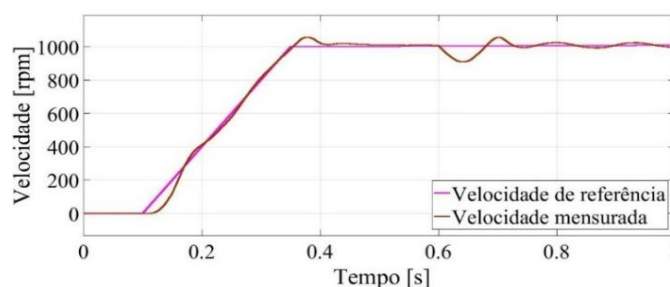
Fonte: Próprio autor.

**Figura 5** - Correntes d-q do MSR com carga.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 6** - Velocidade do MSR com carga.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos apresentaram variação de conjugado em resposta ao degrau de velocidade e acréscimo de carga no segundo cenário resultou mudança na velocidade no instante 0,6 segundos.

## Conclusões

Este trabalho apresenta a análise de desempenho do Motor Síncrono de Relutância em aplicações veiculares. O trabalho apresenta o princípio de funcionamento, estrutura de simulação e modelo matemático do MSR. Os resultados obtidos apresentaram oscilação de conjugado para ambos cenários simulados, enquanto a velocidade do motor mostrou-se proporcional a frequência da rede. Além disso, é possível observar níveis de correntes com baixa magnitude e boa produção de conjugado para degrau de velocidade, embora apresente níveis de oscilação em regime permanente. Dessa forma, este motor mostrou-se eficaz em sistemas de tração devido bom desempenho e, além disso, mostra-se factível as ambições tecnológicas de mobilidade urbana com emissão zero de gases poluentes ao meio ambiente. Como parte do trabalho, sugere-se em atividades futuras implementação de técnicas de controle embarcadas em Dispositivo Processador de Sinal em bancada experimental e verificação dos níveis de corrente, velocidade e conjugado.

## Agradecimentos

Aos integrantes do Núcleo de Pesquisas de Sistemas de Energia (NuPSE) pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho bem como ao Instituto Federal de Goiás – *Campus Itumbiara*.

## Referências Bibliográficas

- MOREIRA, Helena Margarido e GIOMETTI, Analúcia Bueno dos Reis. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. *Contexto int.* [online]. 2008, vol.30, n.1, pp.9-47. ISSN 01028529. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-85292008000100001>.
- ABB. Synchronous reluctance motors - Process performance motors (IEC Low voltage motors) ABB. 2019. <<https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/synchronous-reluctance-motors>>. (acessado em 24/09/2019).
- AMARA, Y. et al. Hybrid excitation synchronous machines: Energy-efficient solution for vehicles propulsion. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 58, n. 5, p.2137–2149, Jun 2009. ISSN 0018-9545.
- BOGLIETTI, A. et al. Thermal analysis of induction and synchronous reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 42, n. 3, p. 675–680, May 2006. ISSN 0093-9994.
- SCALCON, Filipe Pinarello. Contribuições ao acionamento e controle dos motores de relutância variável e síncrono de relutância. Dissertação de mestrado (2019), Universidade Federal de Santa Maria-Rs (2019).
- BOLDEA, I. et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanente magnets: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 61, n. 10, p. 5696–5711, Oct 2014. ISSN 02780046.
- LEE, C. H. The theory and design of a very-slow-speed reluctance motor. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 78, n. 4, p. 1683–1688, Dec 1959. ISSN 0097-2460.
- LIU, Y. et al. Active-flux-based super-twisting sliding mode observer for sensorless vector control of synchronous reluctance motor drives. In: 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7. ISSN 2572-6013.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (2nd Edition). 2. ed. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 047114326X,9780471143260.