



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES GERAÇÕES DE MOTORES SÍNCRONOS A RELUTÂNCIA

Josemar Alves dos Santos Junior^{*1,2}, Darizon Alves de Andrade¹, Marcos Antônio Arantes de Freitas², Ghunter Paulo Viajante², Marcos José de Moraes Filho¹, Cássio Alves de Oliveira¹, Luciano Coutinho Gomes¹.

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

²NuPSE – Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara

Resumo – Este trabalho apresenta um comparativo entre dois motores síncronos a relutância de diferentes formas construtivas. Um construído a partir da modificação do rotor de um motor de indução trifásico e outro transversalmente laminado e sem gaiola de partida. Apresenta também as diferenças de projeto de cada modelo construído e os resultados práticos obtidos nos ensaios realizados em laboratório.

Palavras-Chave – Motor síncrono a relutância, Tipos de motores síncronos a relutância, Motores não convencionais.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN DIFFERENT GENERATIONS OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR

Abstract - This work presents a comparison between two synchronous reluctance motors of different constructive forms. One is included in the modification of the rotor of a three-phase induction motor and another transversely laminated and cageless. It also presents the design differences of each model and the results obtained in the bench tests.

Keywords – Synchronous reluctance motor, Synchronous reluctance motor Types, Non-conventional motors.

I. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda industrial por motores de baixo custo de operação e maior eficiência, o desenvolvimento do motor síncrono a relutância (MSR) se tornou muito atrativo, e graças ao avanço da tecnologia e o desenvolvimento da eletrônica de potência, conversores e técnicas de controle, tornaram este tipo de motor uma opção eficiente, síncrona (comparada ao motor de indução) e de baixo custo

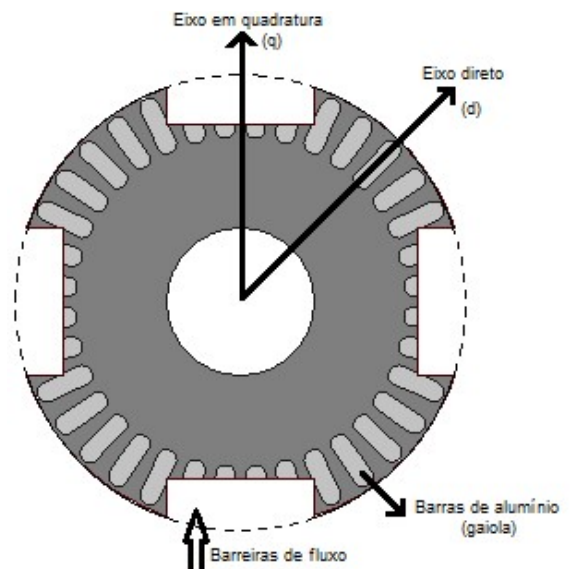
(comparado a motores síncronos de imã permanente) para acionamentos de máquinas, dentre outras aplicações industriais.

Dentre as aplicações para este motor tem-se a movimentação de cargas portuárias, onde operam em conjunto diversos MSR's com mesma velocidade de diferentes pontos de içamento. Na indústria de fibra óptica, onde a bobina deve manter a velocidade constante independentemente do peso da bobina, que varia de acordo com a quantidade de fibra já enrolada.

Por utilizar um estator idêntico ao do motor de indução trifásico (MIT), a diferença está na construção do rotor, que não requer excitação (sem enrolamentos ou imã permanente), e opera de forma semelhante ao motor de polos salientes.

O rotor de primeira geração é construído a partir de um rotor de um MIT, onde cortes são inseridos para que o mesmo possua caminhos de fluxos magnéticos bem definidos. A Figura 1 apresenta um rotor de primeira geração com gaiola de partida.

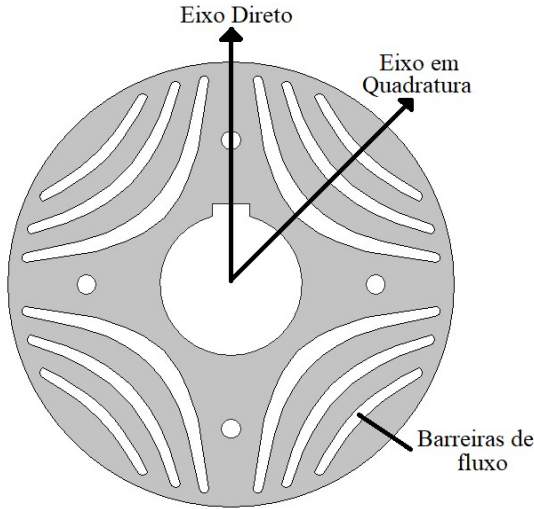
Figura 1: Modelo de rotor para MSR de primeira geração.



*josemarjr@gmail.com

Já o rotor de segunda geração utilizado neste trabalho é constituído de lâminas de aço ferro magnético finas empilhadas ao longo do eixo, com ranhuras (furos/ barreiras de fluxo) com a função de definir o fluxo magnético em torno do rotor, este modelo não apresenta gaiola de partida, fato que diferencia o acionamento deste modelo para o modelo anterior. A Figura 1 apresenta um rotor de segunda geração com as regiões que facilitam (eixo direto) e os cortes (barreiras de fluxo) que dificultam a passagem do fluxo magnético (eixo em quadratura).

Figura 2: Modelo de rotor para MSR de segunda geração de gaiola.



II. MODELO MATEMÁTICO NO SISTEMA D-Q

Diversos estudos de motores síncronos a relutância apresentam o conjugado eletromagnético (T_{em}) tem relação entre indutância direta (L_d) e indutância de quadratura (L_q) do rotor [1]:

$$T_{em} = p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_{sd} \cdot I_{sq} \quad (1)$$

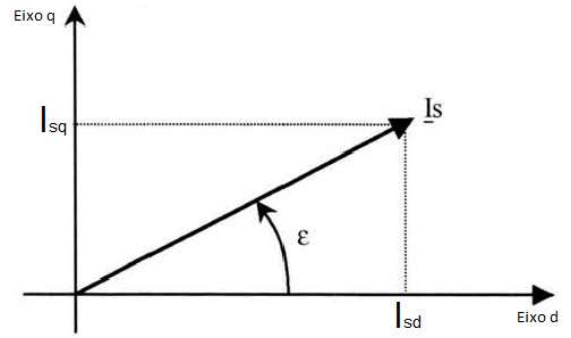
onde p é o número de pares de polos, I_{sd} e I_{sq} são as correntes de estator com referencial no rotor em relação ao eixo d e q , respectivamente, L_d e L_q representam as indutâncias do estator nos eixos d e q , respectivamente.

O módulo da corrente de estator (I_s) é dada por (3) e sua representação fasorial ilustrada na Figura 3.

$$I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2} \quad (3)$$

onde I_{sd} e I_{sq} são respectivamente, a corrente direta e a corrente de quadratura do estator e ε é o ângulo que identifica a posição do fasor de corrente do estator (I_s) em relação ao eixo de regime permanente.

Figura 3: Posição da corrente do estator no referencial d/q.



O fator de potência ($\cos \varphi$) do motor, que corresponde ao deslocamento de fase entre a corrente de linha e a fase da tensão fundamental correspondente está diretamente relacionada a relação entre L_d/L_q , também chamado de fator de saliência (k), e definida como sendo [1] e [2]:

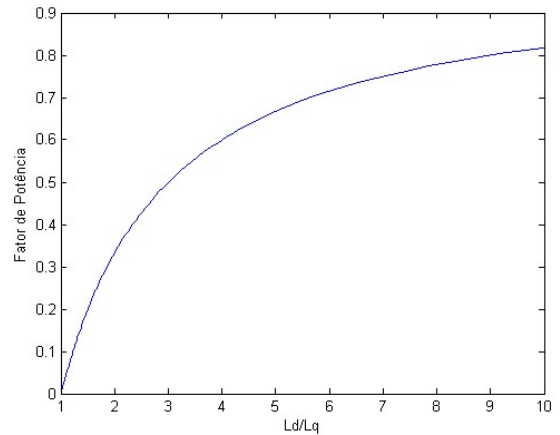
$$\cos \varphi = \frac{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right) \cdot \sin \varepsilon}{\sqrt{\left(\frac{L_d}{L_q}\right)^2 + \tan^2 \varepsilon}} \quad (2)$$

Para o fator de potência máximo ($\cos \varphi_{\max}$), o valor determinante é somente o fator de saliência (L_d/L_q), conforme apresentado pela equação abaixo [1],[3]:

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \quad (3)$$

Para uma faixa de fator de saliência, é possível se determinar o fator de potência máximo para o motor síncrono a relutância conforme apresentado na Figura 4, para k com valores entre 0 e 10.

Figura 4: Fator de potência em função da relação de saliência (L_d/L_q).



Observa-se na Figura 4 que acima de 8 para o fator de saliência, o fator de potência está acima de 0,8 e a medida que este valor aumenta, mais próximo da unidade o fator de potência se aproxima. Porém para motores de baixa potência,

fatores de saliência acima de 10 são difíceis de serem obtidos devido a dimensão do rotor, que com diâmetros pequenos, dificultam a colocação de muitas barreiras de fluxo.

A fundamentação matemática apresentada nesta seção representa o MSR de forma geral, ou seja, pode ser usado para os motores de primeira e segunda geração.

III. PROJETO E CONSTRUÇÃO DOS MOTORES

Os motores foram projetados e construídos de acordo com os valores previamente dimensionados de acordo com a literatura e serão apresentados a seguir.

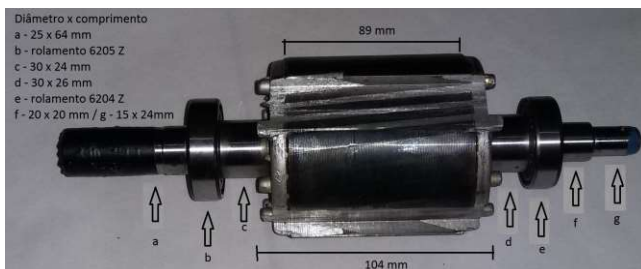
A. Motor Síncrono a Relutância de Primeira Geração.

Este modelo de rotor foi desenvolvido com cortes nas áreas interpolares do rotor de um motor de indução trifásico. De acordo com as especificações do motor, foi possível determinar que cada região interpolar para o rotor equivale ao espaçamento de 4 slots e para a região polar 5 slots, pois o estator apresenta 9 slots por polo.

De acordo com a dimensão do slot do motor, foram realizados cortes paralelos ao eixo com 32,10 mm de arco e 10 mm de profundidade. Com isso a dimensão para cada polo foi de 40,12 mm de arco. A profundidade do corte foi determinada de forma a não interromper por completo a gaiola de partida (em alumínio) existente no rotor, deixando a mesma funcional para sua utilização na partida assíncrona do MSR.

Determinados os valores dos cortes, construiu-se o rotor apresentado na Figura 5.

Figura 5: Rotor do MSR de primeira geração com gaiola.

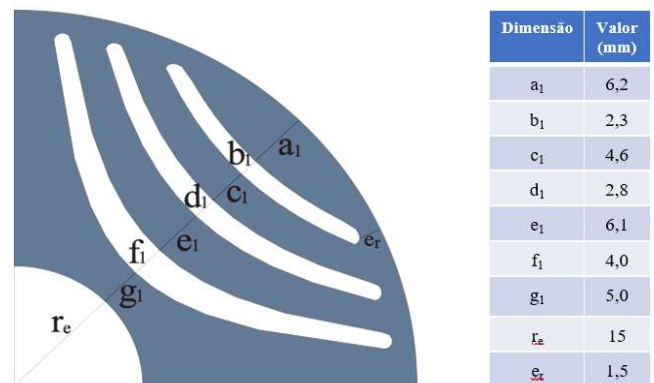


B. Motor Síncrono a Relutância de Segunda Geração.

Após observação dos modelos apresentados por diversos pesquisadores [4], foi definida a construção do modelo apresentado na Figura 2 com 3 barreiras de fluxo por polo sem ponte entre as barreiras devido a observação de menor quantidade de áreas saturadas nas lâminas, transversalmente laminado [4].

As dimensões determinadas em projeto são apresentadas na Figura 6.

Figura 6: Dimensões utilizadas para corte das lâminas do rotor sem gaiola de segunda geração.



De posse de todos os valores para a construção do rotor, foram realizados os cortes de 180 lâminas de 0,5 mm de espessura do aço silício de grãos não orientados E185 para produzir um rotor com 90 mm de comprimento. A Figura 7 apresenta o rotor produzido.

Figura 7: Lâmina cortada (a) e rotor construído (b) para o MSR segunda geração.



C. Estator utilizado na construção dos MSR's.

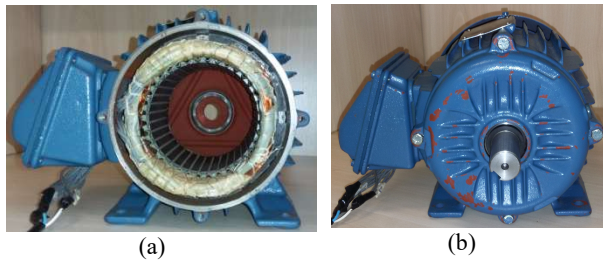
O estator utilizado na construção dos dois é o mesmo utilizado em motores de indução trifásico. A Tabela I apresenta os principais parâmetros do estator.

Tabela I. Dados do estator utilizado na construção dos MSR's.

Parâmetro	Valor
Modelo	W22 PLUS
Potência nominal de saída (kW)	1,5 (2 cv)
Tensão nominal (V)	220 / 380 / 440
Corrente nominal (A)	5,98 / 3,46 / 2,99
Número de polos	4
Frequência nominal (Hz)	60
Número de slots no estator	36
Diâmetro interno (mm)	93

A Figura 8 apresenta o estator utilizado na construção dos dois motores ensaiados neste trabalho.

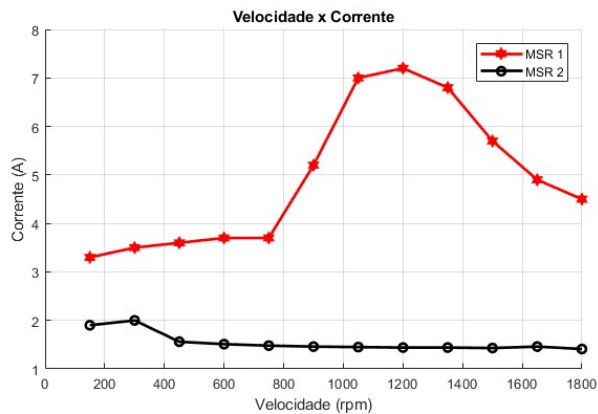
Figura 8: Estator de MIT utilizado na construção dos MSR's aberto (a) e fechado (b).



IV. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MSR'S

O primeiro teste foi o acionamento dos MSR's com diferentes valores de tensão, utilizando um conversor escalar com V/f constante. A Figura 9 apresenta o resultado de cada um dos motores em relação à corrente de consumo.

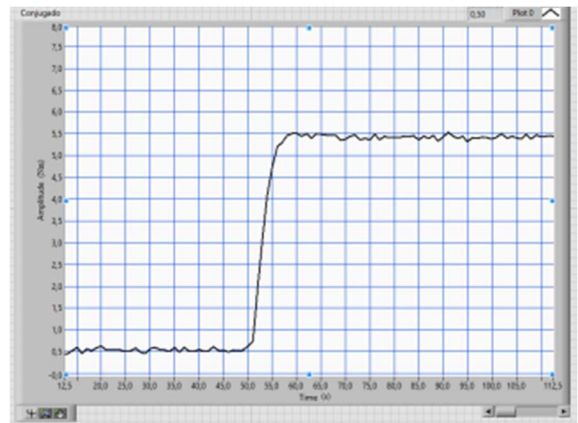
Figura 9: Acionamento do MSR 1 – primeira geração e do MSR 2 segunda geração.



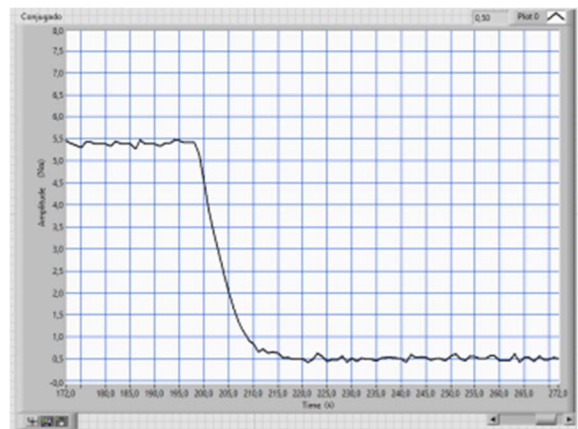
Também com acionamento em malha aberta, foi realizado um teste com degrau de carga para ambos os motores, cada um com sua carga máxima. O MSR de primeira geração apresentou conjugado máximo de 5,5 Nm enquanto que o MSR de segunda geração apresentou 6,5 Nm, estes foram os valores utilizados no degrau de conjugado de carga para cada modelo.

A Figura 10 apresenta o comportamento do MSR primeira geração quando o degrau de carga é imposto Figura 10.a e quando ele é retirado Figura 10.b. É possível observar pela figura que o motor leva menos de 2 segundos para responder ao degrau de conjugado com alimentação

Figura 10: Resposta do MSR primeira geração ao degrau de carga de 5,5 Nm.



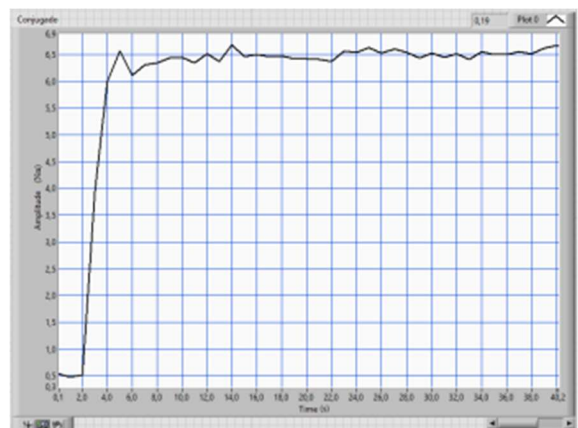
(a)



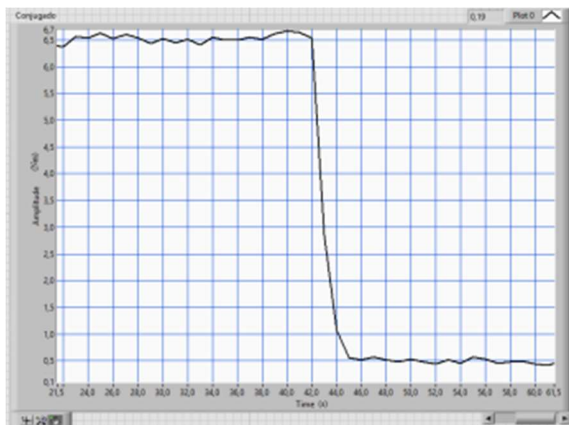
(b)

De forma semelhante é feito o teste para o MSR de segunda geração, onde a Figura 11.a apresenta a resposta à imposição de carga e a Figura 11.b a retirada da carga de 6,5 Nm.

Figura 11: Resposta do MSR segunda geração ao degrau de carga de 6,5 Nm.



(a)



(b)

IV. CONCLUSÕES

Com as observações experimentais foi possível constatar que o MSR se mantém síncrono quando possui carga no eixo para as duas construções apresentadas neste trabalho. No caso destes motores com 4 polos com frequência nominal de 60 Hz, os mesmos operaram com 1800 rpm sem variação da velocidade (escorregamento) durante a imposição de carga no eixo.

Devido ao espaço ocupado pela gaiola, o fator de saliência (L_d/L_q) no motor 1 foi menor, fato que reduziu sua capacidade máxima em relação ao motor 2 em 1 Nm de conjugado.

Os resultados apresentados mostraram que o motor se responde rapidamente ao degrau de conjugado mesmo que operando em malha aberta (controle escalar).

REFERÊNCIAS

- [1] C. E. G. Martins; P. Kuo-Peng ; N. Sadowski. "Design of synchronous reluctance motors with flux barriers using 2D-FEM". IEMDC'03. IEEE International, p. 1669-1673, Vol. 3, 1-4 June, 2003.
- [2] R. E. Betz; R. Lagerquist; M. Jovanovic; T. J. E. Miller; R. H. Middleton; "Control of synchronous reluctance machines," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, no. 6, pp. 1110-1122, 1993.
- [3] T. Lubin; H. Razik; A. Rezzoug. "Magnetic Saturation Effects on the Control of a Synchronous Reluctance Machine". IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September, 2002.
- [4] J. A. Santos Jr.; D. A. Andrade; G. P. Viajante; M. A. A. Freitas; G. A. Lourenço; W. G. Souza, M. J. Moraes Filho; C. X. Rocha. "Análise Matemática E Projeto Do Rotor De Um Motor Síncrono A Relutância". CEEL, Uberlândia, 2016.