

PROJETO DE MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6 E IMPACTO DO ÂNGULO DO POLO DO ROTOR EM SEU DESEMPENHO

Moraes Filho, M. J.; Bianchi, R. B.; Gomes, L. C.; Andrade, D. A.; Silveira, A. W. F. V.; Santos Jr., J. A.;
Oliveira, C. A.; Souza, W. G.

Laboratório de Acionamentos Elétricos, FEELT, Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, Bloco 3N, Uberlândia - MG
E-mails: marcos.jmf@hotmail.com, roberta.bianchi29@gmail.com

Abstract - This paper presents a study of design aspects of the switched reluctance machine 8/6; focusing primarily on the impact of the rotor pole angle of the magnetic and electric quantities, for different values of current and rotor position relative to the stator. Among the various work steps we will bring the definition of the design variables for each machine, the magnetic/ electrical simulations using finite element and simulations of the drive machines in dynamic simulation environment, in order to obtain data to enable the desired comparison.

Keywords - Design, drive, FEMM, asymmetric half-bridge converter topology, rotor pole angle, stator pole angle, switched reluctance machine.

Resumo - Este trabalho apresenta um estudo dos aspectos de projeto da máquina a relutância variável 8/6; focando principalmente o impacto do ângulo do polo do rotor nas grandezas magnéticas e elétricas, para diversos valores de correntes e posições do rotor em relação ao estator. Entre as diversas etapas do trabalho traremos a definição das grandezas de projeto para cada máquina, as simulações magnéticas/ elétricas por meio de elementos finitos e as simulações do acionamento das máquinas em ambiente de simulação dinâmica, a fim de obter dados que possibilitem a comparação desejada.

Palavras-chave - Acionamento, ângulo do estator, ângulo do rotor, FEMM, conversor meia-ponte assimétrico, máquina a relutância variável, projeto.

1 Introdução

Nas últimas décadas devido ao grande avanço de diversas áreas da engenharia elétrica, tais como a eletrônica de potência, microcontroladores, sistemas de sensoriamento, dentre outras; muitas máquinas não convencionais vêm tornando-se objetos de estudos, e dentre estas máquinas temos a máquina a relutância variável (MRV).

Diversos projetos têm sido desenvolvidos tendo como foco a MRV, no sentido de estudar o desempenho da mesma em suas diversas configurações; 4/4 (Costa, 2004), 6/4 (Dias, 2011), 6/6 (Dias, 2011) e 8/6 (Bianchi, 2015), com a máquina em questão atuando tanto como motor quanto gerador. Porém, independentemente da configuração da MRV ou da forma de acionamento da mesma, observa-se algumas diferenças na literatura quanto a etapa de projeto relacionada a medida do ângulo do polo do rotor, de forma que a discussão do quanto esta grandeza pode efetivamente influenciar em aspectos magnéticos, elétricos e mecânicos nas MRVs é inconclusiva.

Dessa forma, este trabalho tem por finalidade fazer uma análise computacional comparativa entre duas MRVs 8/6 com diferentes medidas de ângulo do polo do rotor. A fim de cumprir os objetivos propostos serão apresentados de maneira breve, a modelagem matemática da máquina (Bianchi, 2015), dando enfoque as formas de se definir a medida do ângulo do rotor. Posteriormente será apresentado uma análise computacional feita com o auxílio de ferramentas de ele-

mentos finitos e também com uma ferramenta de simulação dinâmica, onde através dos resultados será possível verificar e comparar o comportamento de ambas as máquinas por meio da análise de algumas grandezas magnéticas e elétricas, tais como o perfil de indutância, o fluxo magnético e o conjugado.

2 Modelagem matemática

Para o início do projeto alguns parâmetros precisaram ser predefinidos para ambas as máquinas, os quais são reunidos na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros pré-definidos para projeto da MRV.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Quantidade de polos no estator	N_s	8 polos
Quantidade de polos no rotor	N_r	6 polos
Potência nominal	P_n	2,2 kW (3 cv)
Velocidade nominal	ω_n	3500 rpm

Com base nesses parâmetros e na literatura a respeito de projeto de máquinas (Miller, 2001) (Krishnan, 2001) foram desenvolvidos os cálculos para obtenção das dimensões das MRVs 8/6; sendo que os mesmos estão detalhados em publicações utilizadas como referência para o trabalho em questão (Bianchi, 2015).

O perfil de ambas MRVs propostas é ilustrado na figura 1.

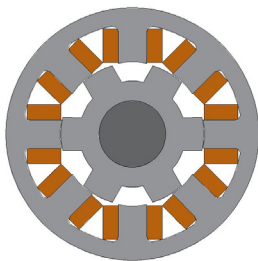


Figura 1. Perfil da MRV 8/6.

O princípio de funcionamento da MRV baseia-se na variação da indutância, grandeza a qual é função da posição do rotor em relação ao estator. Pode-se dizer então que o perfil de indutância é a grandeza fundamental de uma MRV, e como os ângulos do polo do rotor e do estator tem extremo impacto neste perfil, os mesmos devem ser projetados cuidadosamente.

Todavia, apesar do amplo estudo da MRV 8/6 os aspectos e influência do ângulo do rotor não são abordados de maneira particular. Através dos diversos estudos supracitados, ficou claro que a medida do ângulo é de extrema importância, visto que influencia diretamente nos perfis de indutância e fluxo, e consequentemente do conjugado das MRVs.

Há muitas diretrizes a serem seguidas durante a escolha do ângulo do polo do estator. Serão apresentadas algumas delas a seguir.

As referências (Miller, 2001) e (Vijayraghavan, 2001) citam que:

1 - O ângulo do polo do estator deve ser menor que o ângulo do polo do rotor, isto é $\beta_s < \beta_r$. Caso essa condição não seja atendida a máquina pode apresentar redução em sua eficiência devido ao aparecimento de correntes parasitas; efeito causado pelo fenômeno 'fringing flux' - que se trata da dispersão de fluxo magnético, semelhante a um vazamento; as linhas de fluxo se difundem em um intervalo de ar de um circuito magnético. Quando $\beta_s < \beta_r$ então a superfície do polo do rotor absorve as linhas de fluxo, minimizando esse efeito danoso.

2 - A zona de torque efetivo - ângulo através do qual uma fase pode produzir torque útil comparável ao torque nominal - é menor que o ângulo do polo do estator, porém, é maior que o ângulo de condução de energia (ε), ângulo esse que representa o intervalo de comutações de uma fase para outra em um ciclo mecânico da máquina.

De forma analítica o ângulo de condução de energia é definido pela equação:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{N_s}{2} \cdot N_r} \quad (1)$$

Sendo N_s igual ao número de polos no estator e N_r igual ao número de polos no rotor tem-se:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{8}{2} \cdot 6} = 0,2618 \text{ rad} = 15^\circ$$

Se o ângulo do polo do estator for menor que o ângulo de condução de energia, então haverá posições do rotor onde a máquina não vai partir. O que não é o caso desse projeto, pois, foi definido $\beta_s = 22,5^\circ$.

3 - O ângulo existente entre os cantos adjacentes do polo do rotor deve ser maior do que o ângulo do polo do estator, tal que:

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s \quad (2)$$

Caso a condição acima não seja atendida a máquina irá apresentar um valor de indutância mínimo elevado, reduzindo a diferença entre indutância máxima e mínima; interferindo negativamente no torque da máquina.

Essas três condições geram um triângulo de possibilidades, onde o valor dos ângulos dos polos do rotor e estator devem estar dentro dessas delimitações. A figura 2 mostra esse triângulo de possibilidades para a MRV 8/6.

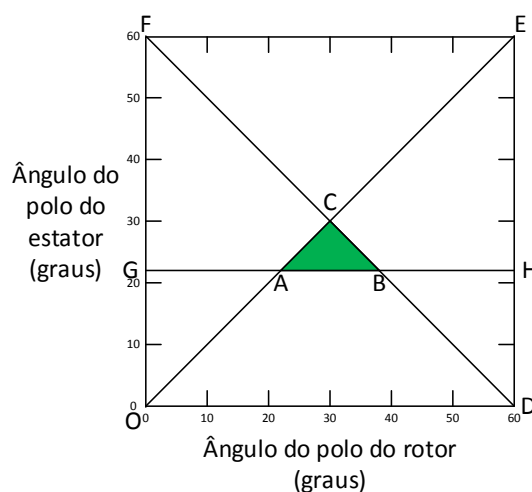


Figura 2. Diagrama do triângulo de possibilidades para MRV 8/6.

Cada região foi delimitada da seguinte forma: a condição 1 é representada pela coordenada OE; a coordenada GH representa a condição 2 e a condição 3 é representada pela coordenada DF. Isso significa que ao definir o ângulo do polo do estator, tem-se uma faixa de valores possíveis para o ângulo do polo do rotor e não um valor específico.

Outro método para encontrar o valor do ângulo do polo do rotor é descrito na referência (Krishnan, 2001) na seguinte forma:

$$\beta_r = \beta_s + \theta_{fr} \quad (3)$$

Onde θ_{fr} é o ângulo de queda da corrente nas condições nominais que permite a produção de torque máximo. Esse ângulo é encontrado de acordo com a equação a seguir:

$$\theta_{fr} = \omega \cdot \frac{L}{R} \cdot \ln \left[1 + \frac{R \cdot I}{V_{dc}} \right] \quad (4)$$

Onde:

ω = Velocidade mecânica [rad/s]

L = Indutância saturada por fase [H]

R = Resistência por fase [Ω]

I = Corrente de pico da fase [A]

V_{dc} = Tensão DC [V]

Porém esse método não se mostrou o mais viável para este projeto, pois, neste ponto não há como calcular a indutância saturada por fase, grandeza a qual é de extrema importância quando não tratamos de perfis ideais.

Um terceiro método para se calcular β_r é proposto na referência (Costa, 2004), método o qual utiliza uma equação para o cálculo direto desse ângulo:

$$\beta_r = \sin^{-1} \left(\frac{t_r}{D_r} \right) \quad (5)$$

Onde:

t_r = Largura dos polos do rotor

D_r = Diâmetro do rotor

Analisando o triângulo de possibilidades exposto na figura 2, o qual propicia uma análise completa do ponto de vista dos ângulos do estator e do rotor, chegou-se a decisão de se projetar duas máquinas com diferentes ângulos para os polos do rotor. A primeira máquina com $\beta_r = 24,5^\circ$ e a segunda com $\beta_r = 27^\circ$, ambos os valores dentro do triângulo de possibilidades mostrado na figura 2.

De acordo com os cálculos desenvolvidos a tabela 2 nos traz as dimensões das duas MRVs. Doravante iremos nos referir a MRV cujo ângulo do polo do rotor é $24,5^\circ$ como MRV-1 e a MRV cujo ângulo do polo do rotor é 27° como MRV-2.

Tabela 2. Resumo das dimensões das MRVs projetadas.

Parâmetro	Siglas	MRV-1	MRV-2
Ângulo dos polos do rotor	β_r	$24,5^\circ$	27°
Ângulo dos polos do estator	β_s	$22,5^\circ$	$22,5^\circ$
Diâmetro externo do estator	D_s	160 mm	160 mm
Diâmetro do rotor	D_r	90,5 mm	89,9 mm
Comprimento do entreferro	g	0,3 mm	0,3 mm
Comprimento do rotor	l	63 mm	63 mm
Largura dos polos do rotor	t_r	18,3 mm	21 mm
Largura dos polos do estator	t_s	17,8 mm	17,6 mm
Altura dos polos do rotor	h_r	15 mm	14,1 mm
Altura dos polos do estator	h_s	22 mm	23,3 mm
Culatra do rotor	Y_r	13 mm	13,6 mm
Culatra do estator	Y_s	12,45 mm	11,45 mm
Diâmetro do eixo	D_{eixo}	34,5 mm	34,5 mm

A figura a seguir retrata a localização das grandezas de projeto apresentadas na tabela 2 através de suas siglas.

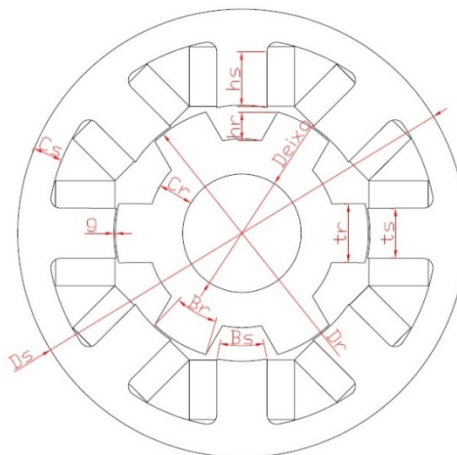


Figura 3. Localização das grandezas de projeto.

3 Simulações magnéticas utilizando o FEMM

Utilizando os dados da tabela 2 as duas máquinas foram modeladas no AutoCad® e em seguida os desenhos foram exportados para o software *FEMM*, onde o funcionamento de ambas as máquinas foi simulado para diversos valores de correntes e posições do rotor. Um código de programação foi utilizado para otimizar essas simulações. A seguir serão apresentadas as figuras que retratam essas simulações.

Na figura 4 temos a análise por meio de elementos finitos utilizando o método de triangulação. Nesta etapa define-se os materiais a serem utilizados na fabricação das máquinas.

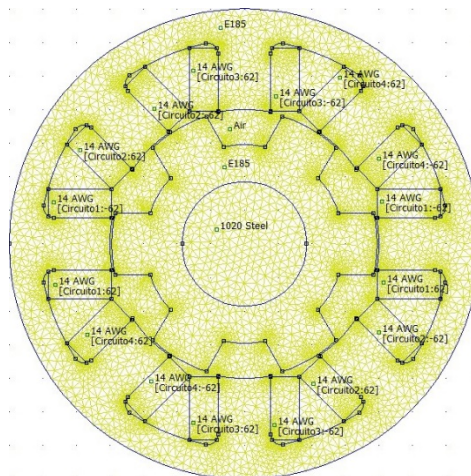


Figura 4. Análise de elementos finitos para as MRVs 8/6.

Nas figuras 5 e 6 temos a representação da densidade de fluxo para ambas as máquinas, e através das mesmas pode-se verificar o efeito do aumento do ângulo do polo do rotor na redução da saturação do cir-

cuito magnético; o que permite atingir valores de fluxos ainda maiores com a adoção das dimensões da MRV-2.

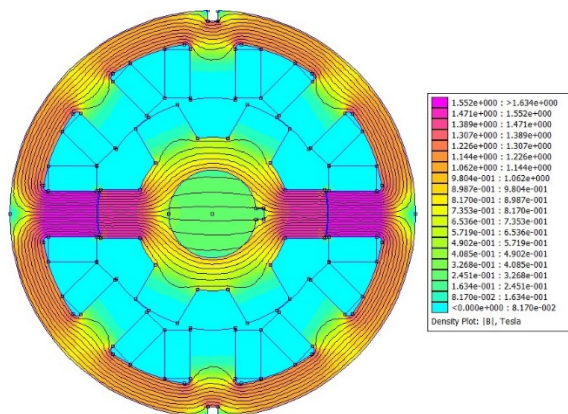


Figura 5. Densidade de fluxo magnético da MRV-1.

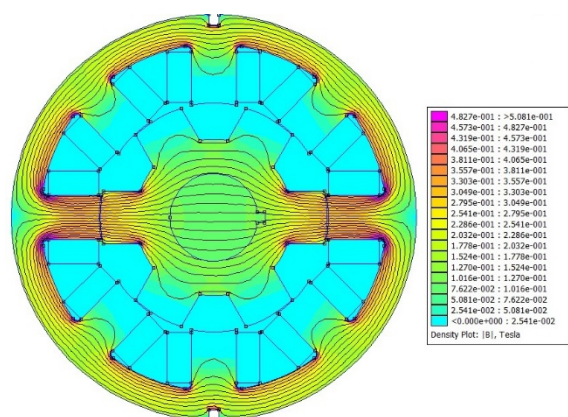


Figura 6. Densidade de fluxo magnético da MRV-2.

Após realização das simulações no FEMM, os dados foram organizados em planilhas e permitiram obter as curvas de indutância para diferentes posições do rotor e correntes de fase. As curvas de indutância para a MRV-1 podem ser vistas na figura 7, já para a MRV-2, na figura 8.

As curvas de fluxo das duas máquinas têm sido obtidas e podem ser visualizadas nas figuras 9 (MRV-1) e 10 (MRV-2).

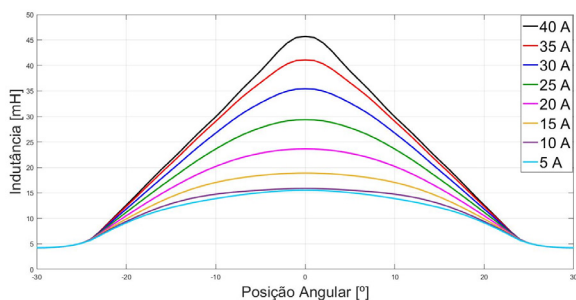


Figura 7. Perfil de indutância da MRV-1, para alguns valores específicos de corrente.

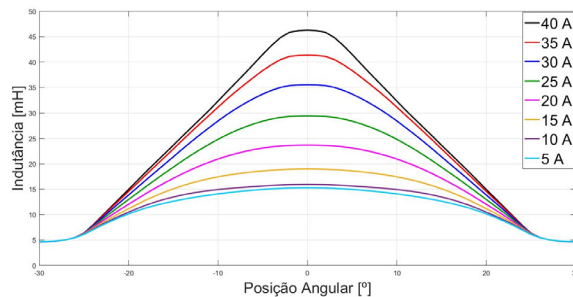


Figura 8. Perfil de indutância da MRV-2, para alguns valores específicos de corrente.

Observa-se o impacto do valor do ângulo do polo do rotor nos perfis de indutância nas figuras 7 e 8, quando se analisa principalmente a curvatura superior e inferior das mesmas, onde na MRV-2 tem-se durante um intervalo maior a presença do valor de indutância máxima e durante um intervalo menor a presença da indutância mínima. O comportamento observado é perfeitamente plausível pois, estes intervalos são frutos da relação entre a diferença de ângulos dos polos do rotor e do estator.

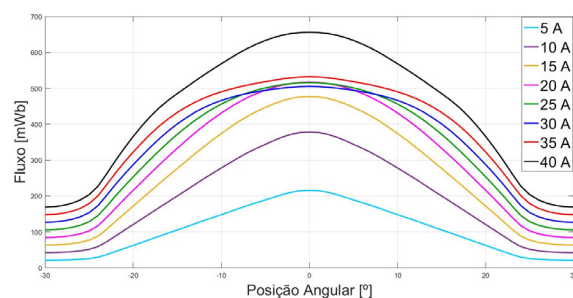


Figura 9. Perfil de fluxo magnético da MRV-1, para alguns valores específicos de corrente.

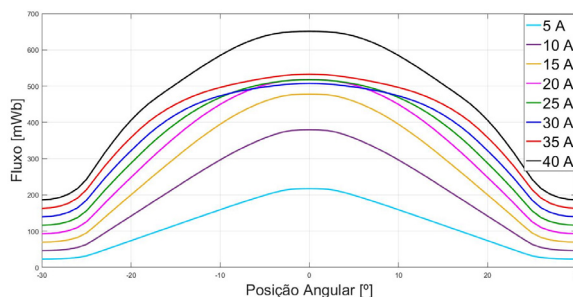


Figura 10. Perfil de fluxo magnético da MRV-2, para alguns valores específicos de corrente.

4 Simulações do acionamento das MRVs

Durante a etapa de simulação do acionamento das máquinas foco deste trabalho no ambiente MATLAB /Simulink definimos a forma de controle e têm sido obtidas e podem ser visualizadas nas figuras 9 (MRV-1) e 10 (MRV-2).

A partir da referência (Krishnan, 2001) temos o perfil de indutância para a MRV não saturada, apresentado na figura 11.

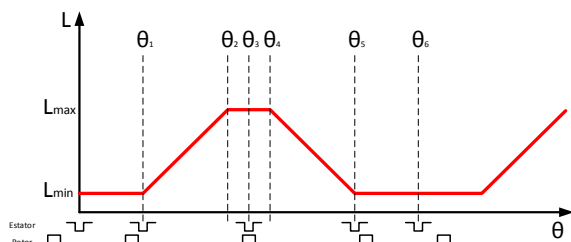


Figura 11. Perfil de indutância para MRV não saturada.

Apesar da impossibilidade prática de termos o perfil de indutância ideal devido a saturação magnética da MRV, sabemos que a saturação causa uma curvatura no perfil de indutância próximo aos pontos de alinhamento dos polos do estator e do rotor (L_{max}) e exerce uma influência negativa no torque da máquina. Todavia o perfil apresentado na figura 11 nos traz pontos angulares que são de extrema importância na etapa de acionamento das máquinas, pois, a partir do mesmo podemos determinar os momentos de energização e desenergização de cada fase da MRV, tal que:

θ_1 - Esta posição indica o ponto na qual inicia-se a sobreposição entre os polos do rotor e do estator, e também o ponto no qual deve-se iniciar a alimentação da fase, pois, no trabalho que segue ambas as máquinas serão acionadas como motores.

θ_2 - Este ponto indica a posição na qual o polo do rotor percorre toda a extensão do polo do estator, e ponto máximo na qual a fase deve ser desenergizada.

θ_3 - Indica a posição na qual os polos do rotor e do estator estão completamente alinhados.

Os pontos θ_4 , θ_5 e θ_6 não serão abordados devido a sua importância principalmente no acionamento das máquinas como gerador, evento o qual não ocorre em nosso estudo.

A topologia de conversor escolhida para acionar a máquina a relutância é o asymmetric half-bridge, que caracteriza-se por possuir duas chaves controladas em série com cada fase da máquina e dois diodos, utilizados para desmagnetização da bobina de cada fase, após o período de magnetização da mesma. O conversor asymmetric half-bridge para a MRV 8/6 pode ser visualizado na figura 12.

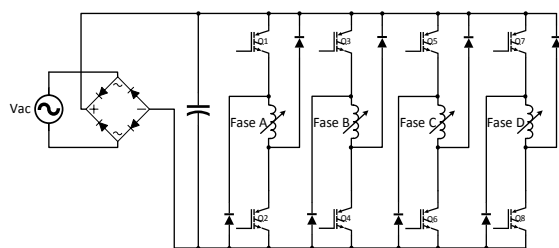


Figura 12. Conversor asymmetric half-bridge.

A estratégia de acionamento implementada consiste em acionar o MRV mantendo um controle sobre a corrente de cada fase e também sobre o alinhamento dos polos do estator com os polos do rotor para cada fase. No Simulink podemos dividir esta estratégia em 2 etapas básicas:

1 - Em uma primeira etapa é aplicada tensão positiva ao enrolamento do motor através do fechamento das duas chaves do conversor, referentes a fase sobre a qual se realiza o controle. As chaves são mantidas acionadas até que a corrente atinja o valor máximo previamente escolhido ou até que os polos do estator e do rotor estejam fora do intervalo permitido para o acionamento de cada fase.

2 - Quando a corrente alcança seu valor máximo ou o ângulo entre o rotor e o estator está fora do intervalo escolhido para a alimentação da fase em questão, inicia-se a etapa 2; que consiste na abertura das chaves, e então a corrente que circula pela fase é forçada a passar pelos diodos do conversor e o enrolamento do motor fica submetido à tensão negativa (tensão reversa). Estando a fase submetida à tensão reversa, a corrente da fase decresce rapidamente.

A fim de analisar o comportamento de ambas as máquinas sobre as mesmas condições, o intervalo de histerese da corrente foi definido entre 6,5 e 7,5 A, tendo como set point 7 A. O ângulo de condução para cada fase foi estabelecido de $36,5^\circ$ até $51,5^\circ$; valores os quais são obtidos respeitando-se a equação 1 e ajustados ao sistema de referências do MATLAB®.

Nas figuras 13 e 14 temos os perfis da indutância e da corrente para a MRV-1 e MRV-2, respectivamente, e devido à imposição do controle não teremos sobreposição de fases neste acionamento.

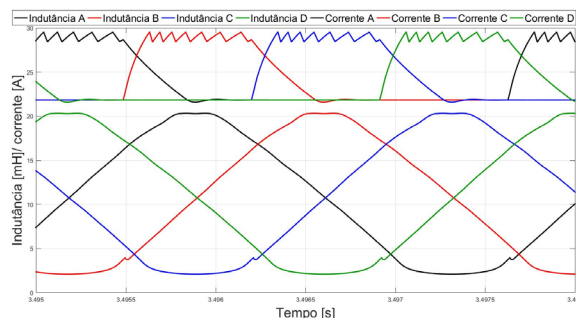


Figura 13. Perfil de indutância e corrente da MRV-1.

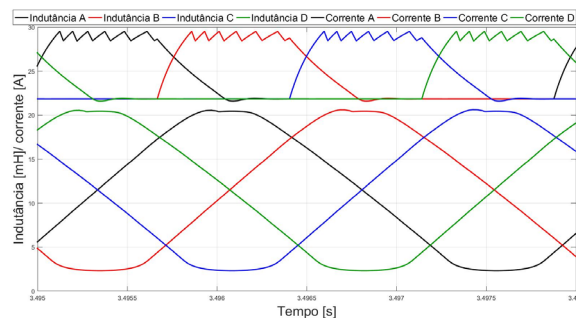


Figura 14. Perfil de indutância e corrente da MRV-2.

Na figura 15 temos as indutâncias da MRV-1 e MRV-2 e a partir da análise de tal figura comprovamos o impacto que o ângulo do polo do rotor exerce sobre o perfil de indutância, e conforme esperado temos que a MRV-2 apresenta um fluxo é um torque levemente superior a MRV-1.

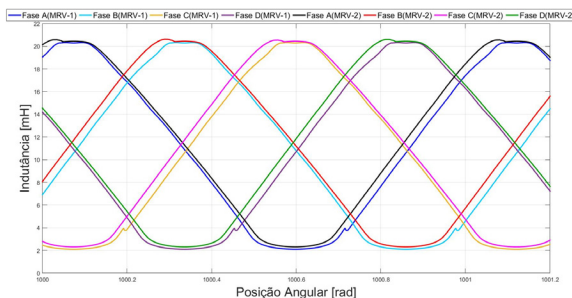


Figura 15. Comparação entre perfil de indutância da MRV-1 e MVR-2.

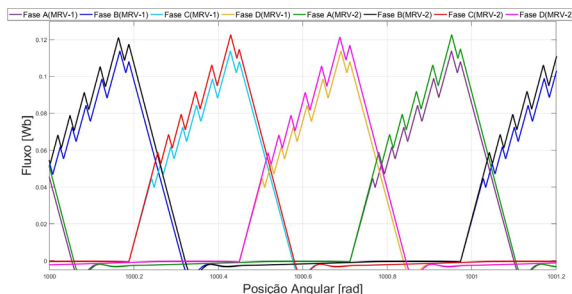


Figura 16. Comparação entre fluxo da MRV-1 e MVR-2.

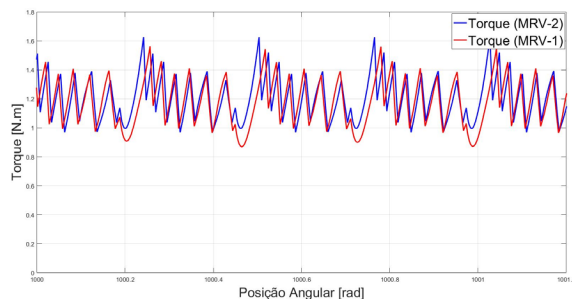


Figura 17. Comparação entre torque da MRV-1 e MVR-2.

Uma possibilidade para se extrair mais vantagens da MRV-2 é a opção de se trabalhar com uma corrente levemente superior pelo fato da mesma apresentar uma saturação menor em seu circuito magnético, permitindo a obtenção de um torque maior para um mesmo volume, quando comparada a MRV-1.

5 Conclusão

A partir deste trabalho temos que o impacto do ângulo do polo do rotor das MRVs apresenta-se como um parâmetro que deve ser melhor avaliado, pois, pode-se obter um melhor aproveitamento, mesmo que percentualmente pequeno, da máquina com modificações relativamente simples ainda na etapa de projeto.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Uberlândia pela infraestrutura disponibilizada.

Referências Bibliográficas

- Bianchi, R.B. e Andrade, D.A. (2015). Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância de Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos. CBQEE.
- Costa, R.S. (2004). Análise, projeto e construção de um motor monofásico a relutância chaveado: uma solução eficiente para cargas de potência fracionária, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia.
- Dias, R.J. (2011). Motores a Relutância Variável 6X4 e 6X6. Estudo Comparativo de Operação e Desempenho, dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia.
- Krishnan, R. (2001). Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press.
- Miller, T.J.E. (2001). Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes.
- Vijayraghavan, P. (2001). Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives, dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in electrical engineering.