

Projeto de um Motor Linear de Relutância Variável e Simulação Através do Método de Elementos Finitos

Breno Brito Miranda, José Roberto Camacho

Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia-MG, Brasil
brenobritomiranda@hotmail.com
jrcamacho@ufu.br

Resumo—O projeto de um modelo de motor linear de relutância variável (MLRV) unilateral do tipo fluxo longitudinal é desenvolvido através da equação da potência de saída do motor de relutância variável. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado para a verificação dos cálculos analíticos. O modelo desenvolvido utiliza o projeto de um motor rotativo de relutância variável (MRRV), convertendo as especificações do MLRV no seu equivalente rotativo. Os resultados obtidos através do MEF são os valores da indutância em relação à posição do translador e os valores das forças normal e de propulsão em função da corrente e em relação à posição do translador.

Palavras-chave— elementos finitos; máquinas lineares; motores lineares de relutância variável.

I. INTRODUÇÃO

Máquinas lineares são melhores alternativas para o uso em aplicações que necessitam do movimento linear, reduzindo a necessidade de sistemas de engrenagem e polias, utilizados na conversão de movimento rotativo em translacional por meio de máquinas rotativas. Motores síncronos lineares de ímã permanente e motores de indução são prevalentes em aplicações industriais particularmente quando alta performance dinâmica é requerida [1]. Motores lineares de relutância variável (MLRVs) tem características construtivas simples com bobinas concentradas, ao invés de distribuídas, e ausentes na parte do rotor [2], dependendo menor custo na construção e manutenção da máquina. No entanto, o MLRV tem algumas desvantagens tais como alta força ripple, vibração e ruído acústico devido à estrutura duplamente saliente [3].

Existem dois tipos de MLRVs: fluxo transversal e longitudinal. O caminho de fluxo na máquina de configuração de fluxo transversal ocorre na direção de movimento do translador. Esta máquina é de construção mais simples, mecanicamente robusta e tem menores perdas por correntes *eddy*, porquanto o fluxo se encontra na mesma direção do movimento do translador [4]. A estrutura de um MLRV consiste de um estator laminado em material de aço, translador e bobinas, podendo estas ser fixadas tanto no estator quanto no translador. Se as bobinas são fixadas no estator, este é chamado de parte ativa, conseqüentemente o translador é a parte passiva. A máquina de relutância variável (MRV) é configurada de maneira que pares de bobinas sejam conectadas em série e excitadas ao mesmo tempo. Assim, o translador tende a se mover de forma a

se alinhar com as linhas de fluxo magnético [5]. Esta posição corresponde à posição de total alinhamento, produzindo máxima indução de fase.

O projeto de um MLRV unilateral (*single-sided*) do tipo fluxo longitudinal trifásico com estator ativo e translador passivo é verificado neste artigo através do software *FEMM* (*Finite Element Method Magnetics*) desenvolvido por *David Meeker* e auxiliado pela linguagem *LUA*. A vantagem da utilização do estator ativo é que a fonte de alimentação e os conversores de potência permanecem estacionários, o que resulta na redução do peso do translador. O procedimento proposto [4] transforma as especificações do projeto de um MLRV nas especificações equivalentes de um motor rotativo de relutância variável (MRRV) para que então as dimensões sejam convertidas em seu equivalente linear.

II. TOPOLOGIA DO MLRV

A fig. 1 mostra a vista da seção transversal da estrutura de uma máquina trifásica convencional. O LSRM tem um estator ativo e um translador passivo de fluxo longitudinal. Contém 6 polos no translador, correspondente à configuração 6/4 do MRRV. A disposição de 6 polos no translador é proposta para evitar o surgimento do fluxo reverso no instante da comutação da corrente de fase, o que resultaria na diminuição da performance do MLRV, alto ruído e perdas no núcleo intensificadas.

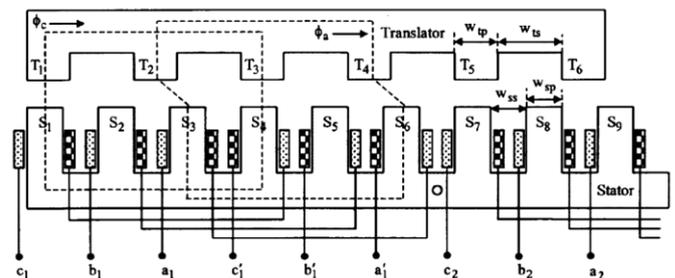


Fig. 1 – Estrutura do LSRM e diagrama dos enrolamentos: direção dos fluxos magnéticos gerados a partir da excitação das bobinas da fase *c* e fase *a*.

Para que haja o movimento do translador da esquerda para a direita, os pares de bobinas *alal'*, *blbl'* e *c2c2'* devem ser

excitados em seqüência. O círculo existente entre os polos S6 e S7 indica a divisão de setores, cada um composto por seis polos.

A. Seleção das dimensões (MRRV)

O modelo desenvolvido é derivado da equação de saída para o MRV. Esta relaciona o diâmetro externo do MRRV, comprimento, velocidade, e o carregamento elétrico e magnético com a potência de saída da máquina [2]. A equação da potência de saída é dada por

$$P = k_e k_d k_1 k_2 B_g A_{sp} D^2 v_m^3 * 60 / \pi \quad (1)$$

onde

| | |
|-----------------------|--|
| P | potência de saída; |
| k_e | eficiência; |
| $k_1 = \pi^2 / 120$; | |
| k_2 | variável baseada no ponto de operação; |
| k_d | ciclo de trabalho (<i>duty</i>); |
| B_g | densidade de fluxo no entre-ferro; |
| A_{sp} | carregamento elétrico específico; |
| D | diâmetro interno; |
| v_m | velocidade máxima. |

A eficiência da conversão eletromagnética k_e está entre 0,3 a 0,4. Em geral, a constante k_2 é escolhida entre

$$0,65 < k_2 < 0,75 \quad (2)$$

O carregamento elétrico específico fica na faixa de

$$25000 < A_{sp} < 90000 \quad (3)$$

Para $kd=1$, a potência desenvolvida é máxima. A largura da pilha L é dado por

$$L = kD \quad (4)$$

onde k para aplicações gerais é escolhido entre

$$0,25 < k < 0,70 \quad (5)$$

A partir das dimensões e características mecânicas desejadas — comprimento do estator, velocidade máxima do veículo, tempo de aceleração e máxima carga do sistema do translador — para o projeto do MLRV, das variáveis acima descritas e da capacidade de potência, todas as dimensões do MLRV são calculadas [6]. A capacidade de potência do motor é dada por

$$P = M * v_m^2 / t_a \quad (6)$$

onde

| | |
|-------|---------------------------------|
| M | massa do sistema do translador; |
| v_m | velocidade máxima; |
| t_a | tempo de aceleração. |

Encontrando-se o valor de P de (6), a variável D é calculada a partir de (1). A espessura da culatra do estator C é dado por

$$C = D\beta_s / 2 \quad (7)$$

onde β_s é o ângulo do arco polar do estator. O diâmetro externo D_0 é 1,4 a 2,5 vezes maior que o diâmetro interno. A altura do polo do estator é, então, calculado por

$$h_s = D_0 / 2 - D / 2 - C \quad (8)$$

A largura da culatra do rotor C_{ry} é

$$C_{ry} = D\beta_r / 2 \quad (9)$$

enquanto que a altura do polo do rotor é dado por

$$h_r = D / 2 - g - C_{ry} \quad (10)$$

O número de enrolamentos por fase T_{ph} é calculado através da corrente máxima nominal permitida pela máquina, i , comprimento, g , e intensidade do campo magnético do entreferro H_g

$$T_{ph} = 2 * H_g * g / i \quad (11)$$

$$H_g = B_g / \mu_0 \quad (12)$$

Para o dimensionamento da bobina, a área e o diâmetro do condutor, a_c e d_c , respectivamente são dados por

$$a_c = i / (J * m^{1/2}) \quad (13)$$

$$d_c = (4a_c / \pi)^{1/2} \quad (14)$$

onde J é a máxima densidade de corrente permitida na bobina e m é o número de fases.

B. Conversão dos parâmetros rotativos em lineares

As larguras do polo e da culatra do estator do MLRV, w_{sp} e w_{ss} , respectivamente, são

$$w_{sp} = C \quad (15)$$

$$w_{ss} = (\pi D - 6w_{sp}) / 6 \quad (16)$$

As larguras do polo e da culatra do translador, w_{tp} e w_{ts} , respectivamente, são,

$$w_{tp} = C_{ry} \quad (17)$$

$$w_{ts} = (\pi D - 4w_{tp}) / 4 \quad (18)$$

Logo, o comprimento do translador é dado por

$$L_{tr} = 6w_{tp} + 5w_{ts} \quad (19)$$

A largura da pilha do MLRV é equivalente ao do MRRV, assim

$$L_w = L \quad (20)$$

O número de camadas na vertical e na horizontal da bobina, N_v e N_h , respectivamente, são dados por

$$N_v = F_f (h_s - w) / d_c \quad (21)$$

$$N_h = T_{ph} (2 * N_v) \quad (22)$$

onde F_f é o fator de empacotamento da bobina e w é a distância entre a altura do polo e a altura da bobina, denominado cunha. A área da bobina é então obtida através de

$$area = 2a_c N_v N_h / F_f \quad (23)$$

E o fator de preenchimento FF é dado por

$$FF = area / (w_{ss} (h_s - w)) \quad (24)$$

A faixa de valores de FF para que as bobinas não encostem uma na outra é $0,2 < FF < 0,5$.

C. Dimensões do modelo

O MLRV é projetado para um comprimento de 2,2 m, com velocidade máxima de 0,75 m/s, tempo de aceleração de 0,70 s e a massa do translador é restringida em 50 kg.

Para o projeto do MRRV, assume-se o arco polar do estator $\beta_s = 30^\circ = 0,5236$ rad e o arco polar do rotor $\beta_r = 34^\circ = 0,5934$ rad. As seguintes constantes foram selecionadas como segue: $k_e=0,4$, $k_d=1$, $k_2=0,72$, $k=0,6$, $B_g=1,18$ T, $A_{sp}=30000$. As equações (1)-(24) são utilizadas para desenvolver o projeto do MLRV. A tabela I mostra as dimensões calculadas e os materiais escolhidos.

TABELA I. DIMENSÕES DO MLRV

| Dimensões do MLRV (mm) | | | | | |
|------------------------------------|-----|----------------------------------|----|----------------------------|------------|
| Largura do MLRV | 45 | Altura do polo do translador | 14 | Número de espiras por fase | 221 |
| Comprimento do translador | 322 | Largura do polo do estator | 20 | Largura do entreferro | 1 |
| Espessura da culatra do estator | 20 | Largura da ranhura do estator | 20 | Condutor | 18 AWG |
| Espessura da culatra do translador | 22 | Largura do polo do translador | 22 | Material | M-19 Steel |
| Altura do polo do estator | 28 | Largura da ranhura do translador | 38 | | |

A curva de magnetização do material magnético é mostrado na fig. 2.

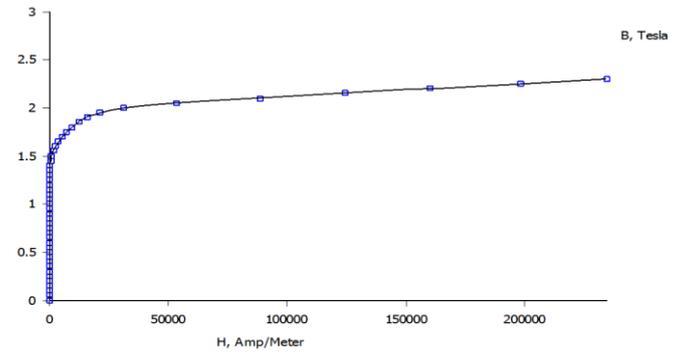


Fig. 2 – Curva de magnetização B-H do material magnético de aço silício de grão não-orientado (M-19 Steel).

III. CÁLCULOS ANALÍTICOS

A. Cálculo de indutância

De acordo com [4], para o cálculo de indutância, o motor é dividido em quatro regiões com diferentes caminhos de fluxo conforme fig. 3-6. Para cada posição do translador em relação ao estator, as permeâncias no entreferro são calculadas de acordo com as dimensões do motor e dos caminhos de fluxo referentes à posição a qual se encontra o translador.

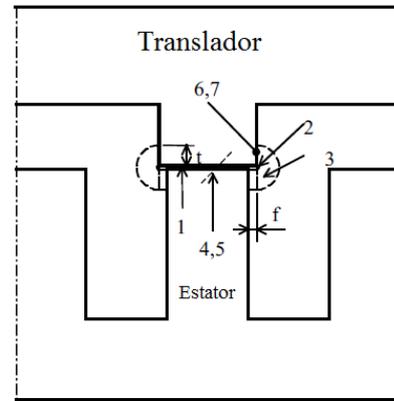


Fig. 3 – Caminhos de fluxo da região 1.

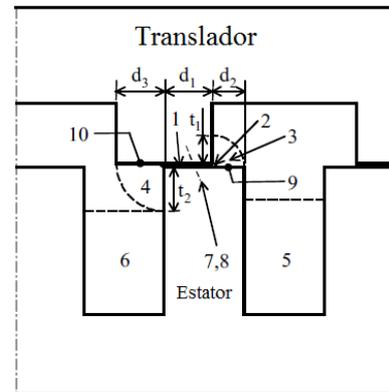


Fig. 4 – Caminhos de fluxo da região 2.

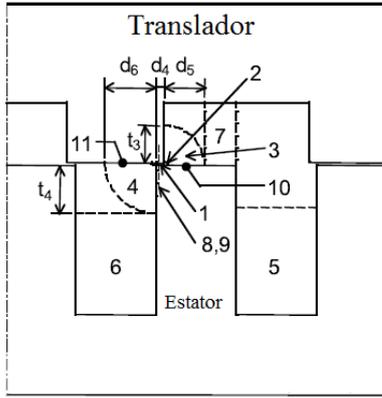


Fig. 5 – Caminhos de fluxo da região 3.

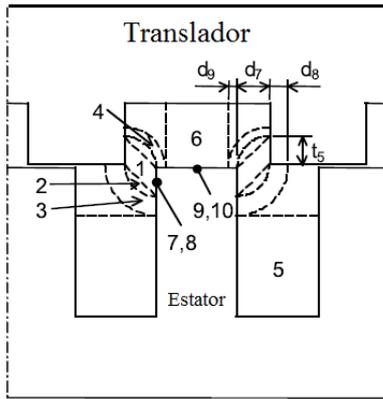


Fig. 6 – Caminhos de fluxo da região 4.

A abordagem e equacionamento das permeâncias para os diferentes caminhos de fluxo em cada região fogem ao escopo deste trabalho. A indutância é então, calculada através de

$$I = 2P_g (T_{ph}/2)^2 \quad (25)$$

onde P_g é a permeância no entreferro para cada posição.

B. Cálculo das forças

As forças são calculadas através do princípio da conservação de energia. A força normal sobre uma fase é calculada pela equação

$$F_z = B_g^2 XY / (2\mu_0) \quad (26)$$

onde X e Y são os comprimentos de sobreposição nas posições distintas. A força total aplicada ao translador é de $2 * F_z$. Deslocando-se o translador, o valor de X é modificado, enquanto que Y permanece constante.

IV. ANÁLISE VIA ELEMENTOS FINITOS EM DUAS DIMENSÕES

A utilização do método dos elementos finitos (MEF) simplifica o problema, dividindo o domínio da solução em vários sub-domínios (i.e. triângulos) de forma a aproximar as soluções do potencial vetor magnético A com a solução exata. A análise em elementos finitos envolve quatro passos:

- Discretização da região de solução em um número finito de elementos;
- Equações que regem o problema para um elemento típico;
- Montagem de todos os elementos na região de solução;
- Solução do sistema de equações obtido.

A. Modelagem magnetostática

Como ferramenta complementar, a linguagem *LUA* desenvolvida para o uso no *FEMM* auxilia no desenho da geometria. A linguagem permite que o desenho seja esboçado em linhas de programação a partir da entrada das dimensões e o número de polos do estator e translador desejadas, rodeando as dificuldades enfrentadas pelo usuário utilizador do *CAD* (*Computer aided design*), ferramenta essa também disponível no *FEMM*. As três etapas envolvidas —pré-processamento, processamento e pós-processamento— são abordadas por meio de scripts através do *software Lua Edit 2010*.

O projeto do MLRV através da equação da potência de saída é verificado por meio das características de indutância e forças normal e de propulsão agindo no translador versus posição do translador. As figs. 7 e 8 mostram o desenho do MLRV e as linhas de fluxo no *software 2D* nas posições alinhada e desalinhada, respectivamente.

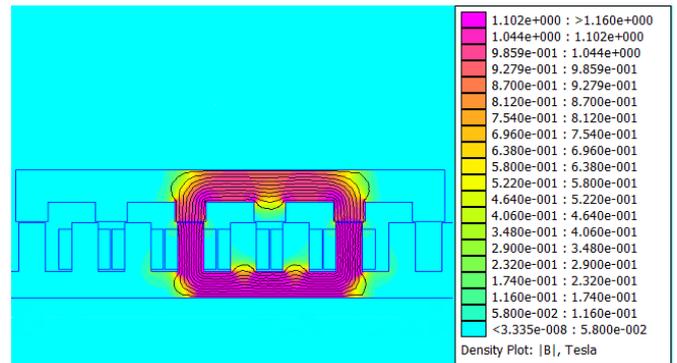


Fig. 7 – Linhas de fluxo na posição totalmente alinhada.

Ambas as forças normal e de propulsão são obtidas através do bloco integral *Weighted Stress Tensor*. A fig. 9 mostra os resultados de indutância através da análise de elementos finitos comparados com os valores analíticos considerando *end effect*, aplicando-se uma corrente de 8,5 A. A fig. 10 mostra os resultados da força normal obtidos pelo programa *FEMM* comparados com os resultados analíticos e de elementos finitos. A fig. 11 mostra os resultados da força de propulsão com a mesma justificativa dada para a fig. 10.

V. CONCLUSÕES

O modelo projetado para verificação no *FEMM* é baseado na equação de saída similar às máquinas convencionais de corrente alternada. Os resultados obtidos são comparados aos cálculos analíticos baseados na posição do translador desde o seu desalinhamento até seu alinhamento total. Os perfis de indutância e as forças normal e de propulsão obtidos através do programa são equivalentes aos cálculos analíticos. Efeitos de histerese podem ser analisados em trabalhos futuros de forma a analisar o efeito comportamental no MLRV.

AGRADECIMENTOS

O autor Breno Brito Miranda agradece à CAPES pelos recursos destinados ao desenvolvimento deste trabalho e pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Muhammad, "Analysis, Design and Control Aspects of Linear Machines Using Co-simulation," KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2012.
- [2] R. Krishnan, R. Arumugam, James F. Lindsay, "Design Procedure for Switched-Reluctance Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 3, May/June 1988.
- [3] N. C. Lenin, R. Arumugam, "Design and Experimental Verification of Linear Switched Reluctance Motor with Skewed Poles," International Journal of Power Electronics and Drive System, Vol. 6, No. 1, March 2015, pp. 18-25.
- [4] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives Modeling Simulation Analysis Design and Applications," Industrial Electronics Series. CRC Press LLC, 1. ed, 2001, pp. 111-195.
- [5] C. Praveen Kumar, K. Geetha, K. Madhavi, "Design, Modeling and Analysis of Linear Switched Reluctance Motor for Ground Transit Applications," IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), e-ISSN: 2278-1676,p-ISSN: 2320-3331, Volume 10, Issue 1 Ver. III (Jan - Feb. 2015), PP 01-10.
- [6] Byeong-Seok Lee, Han-Kyung Bae, V. Praveen, R. Krishnan, "Design of a Linear Switched Reluctance Machine," IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 36, No. 6, November/December 2000.

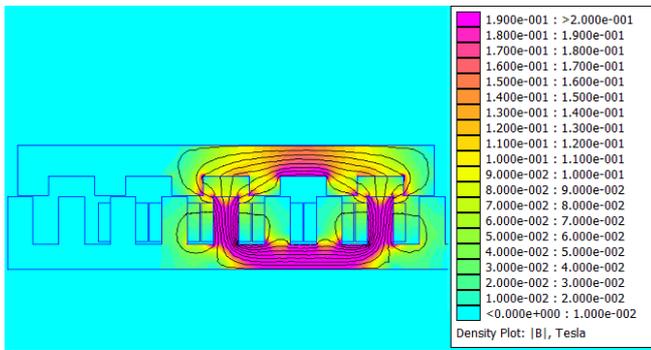


Fig. 8 – Linhas de fluxo na posição totalmente desalinhada.

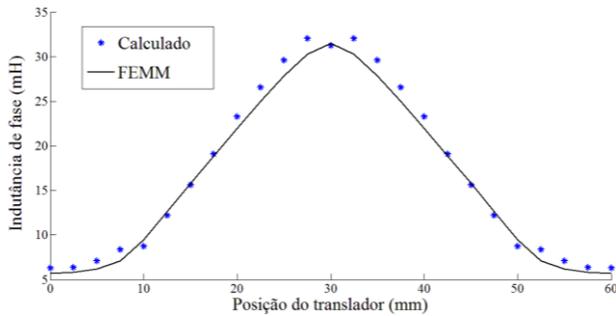


Fig. 9 – Resultados da análise em elementos finitos e dos valores analíticos de indutância na corrente nominal.

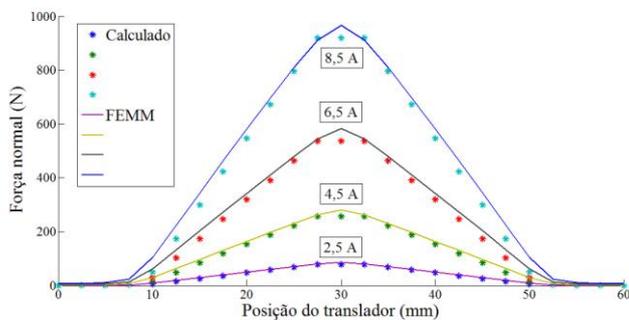


Fig. 10 – Resultados da análise em elementos finitos da força normal em diferentes valores de correntes em comparação com os resultados analíticos.

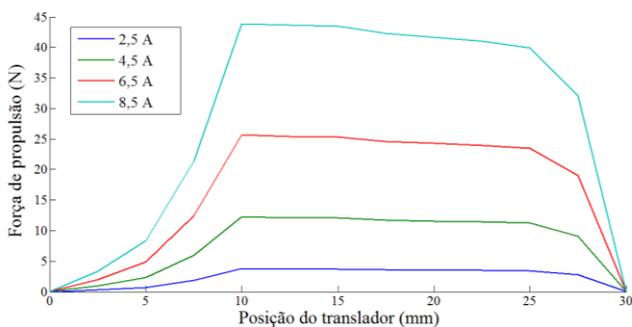


Fig. 11 - Resultados da análise em elementos finitos da força de propulsão em diferentes valores de correntes.