

Estudo, análise e desenvolvimento de um motor linear de passo com ímãs permanentes

N. F. Baggio Filho¹

¹*Departamento de Eletrotécnica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, 95180-000, Farroupilha-RS, Brasil*

nolvi.filho@farroupilha.ifrs.edu.br

(Recebido em 03 de dezembro de 2013; aceito em 01 de agosto de 2014)

O presente trabalho apresenta um motor linear de passo, com ímãs permanentes de alto produto energético – MLP – para movimentações planares onde a combinação de precisão e velocidade é requerida. Assim, neste estudo é apresentado um MLP formado por uma estrutura linear e estática de material ferromagnético, onde são montadas seis bobinas e uma estrutura móvel, em forma de U, onde são fixados dois ímãs permanentes. Um sistema mecânico de suspensão permite que a parte móvel se movimente linearmente sobre a parte estática, mantendo um entreferro constante. O princípio de funcionamento está baseado na Força de Lorentz, que prevê que quando um fio condutor, percorrido por corrente elétrica, estiver imerso em um campo magnético sobre ele atuará uma força de origem eletromagnética, assim, no MLP, a movimentação relativa entre as partes móvel e estática, bem como a velocidade e a intensidade da força planar fica condicionada a sequência de chaveamento das seis bobinas e da intensidade da corrente elétrica nelas aplicada. O estudo desse dispositivo está baseado ainda, na utilização de uma análise numérica, a partir de um protótipo virtual, e uma análise experimental, a partir de um protótipo físico, investigando e comparando grandezas como: força eletromagnética e densidade de fluxo magnético. Resultados preliminares dão conta de que a força linear motriz do dispositivo é de 2,63 N/A (Newton por Ampère), quando as bobinas estão completamente alinhadas com os ímãs permanentes e 1,55 N/A quando as bobinas estão apenas 50% alinhadas.

Palavras-chave: motor linear de passo, força longitudinal, fluxo magnético.

Study, analysis and development of a linear stepper motor with permanent magnetis.

This work presents a linear stepper motor with permanent magnetics with high energy product – MLP – for planar movements where the combination of precision and speed are required. Thus, this study present a MLP consist of a linear and static structure of ferromagnetic material, which are mounted six coils and a mover structure, U-shaped, in which two permanent magnets are fixed. Mechanical suspension systems allow a linear movement between static and mover part, maintaining a constant air gap. The operating principle is based on the Lorentz Force, which provides that when a conductor, excited with electric current, is immersed in a magnetic field it acts an electromagnetic force, so, in the MLP, the relative motion between the static and mover parties, as well as the speed and intensity of the force is conditional to the sequence of switching the six coils and the intensity of the electrical current applied on them. The study of this device is still based on the use of numerical analysis, from a virtual prototype, and an experimental analysis, from a physical prototype, investigating and comparing quantities such as: electromagnetic force and magnetic flux density. Preliminary results realize that the driving force of the linear device is 2.63 N / A (Newton per Ampere), when the coils are completely aligned with the permanent magnets and 1.55 N / A when the coils are only 50% aligned.

Keywords: linear stepper motor, longitudinal force, magnetic flux.

1. INTRODUÇÃO

Correntemente, processos de manufatura industrial requerem movimentação linear. Usualmente isso é feito utilizando máquinas rotativas conectadas a conversores mecânicos como: polias, rolamentos, engrenagens, esteiras entre outros. Alternativamente, porém com menos uso, são os dispositivos eletromagnéticos baseados em motores lineares, também conhecidos como atuadores lineares, onde o controle pode ser feito por métodos digitais

combinados com dispositivos eletrônicos. O motor linear de passo (MLP), proposto nesse trabalho, é uma alternativa para aplicações onde é requerida alta velocidade e elevada precisão de posicionamento (BASAK, 1996), (BAGGIO FILHO, 2005).

1.1 Atuadores Eletromecânicos

Atuadores eletromecânicos são dispositivos que podem produzir movimentos com um ou mais graus de liberdade. Basicamente, os atuadores elétricos são máquinas que convertem energia elétrica em energia mecânica associada ao movimento de translação. Neste contexto, os atuadores elétricos que desenvolvem diretamente movimento ao longo de um deslocamento linear são classificados como Atuadores Lineares; já aqueles que desenvolvem movimento sobre o plano são denominados de Atuadores de Superfície, Atuadores XY ou ainda Atuadores Planares (BAGGIO FILHO, 2005).

A grande maioria dos motores elétricos é construída para desenvolver movimentos rotativos em resposta a uma excitação eletromagnética, sendo que a conversão para movimentos linear ou planar ocorre pela associação de conversores mecânicos. Isso gera perdas, o que, além de diminuir a eficiência do dispositivo, dificultam o controle, interferem negativamente no desempenho do conjunto e exigem uma manutenção periódica e muitas vezes onerosa.

Com a utilização de atuadores elétricos, esses movimentos de translação planar ou linear podem ser obtidos diretamente, sem a necessidade de conversores e arranjos mecânicos. Na maioria dos casos, o único contato mecânico existente é um sistema de suporte entre o translator e os trilhos, com a finalidade de manutenção de um curso linear ou planar e sustentação, contudo em outros casos é possível se valer dos princípios da levitação magnética, eliminando completamente os contatos mecânicos entre as partes (BASAK, 1996).

1.1.1 Atuadores Lineares

Também conhecidos como motores lineares, os atuadores lineares são máquinas elétricas que desenvolvem movimentação sobre uma trajetória linear, com apenas um grau de liberdade. Podem ainda ser definidos como um transdutor eletromagnético que converte uma excitação eletromagnética em um movimento de translação em linha. Essas máquinas elétricas são melhor entendidas e explicadas quando tratadas como um motor rotativo que é aberto sobre um plano, possibilitando, pelos mesmos princípios eletromagnéticos, um movimento em linha, conforme indica a Figura 1. Enquanto que em motores rotativos os parâmetros de referência são velocidade angular e conjugado, nos atuadores lineares as componentes são referenciadas à força e à velocidade de translação (MILLER, 1993).

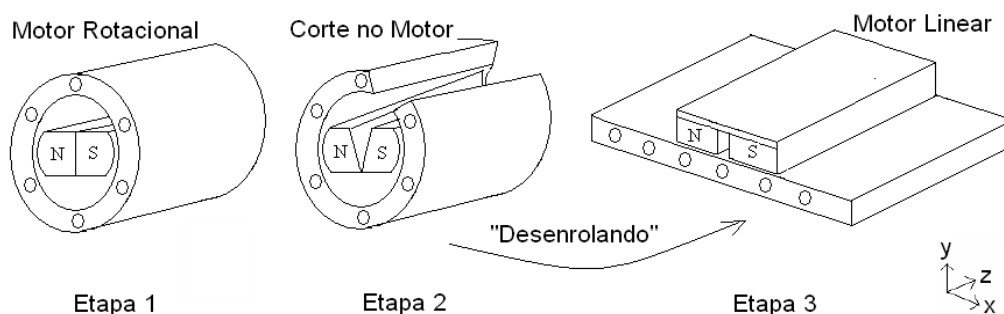


Figura 1: Transformação elementar de um motor rotativo em um motor linear (DEL TORO, 1985).

A ideia desse tipo de dispositivo não é recente. Data-se que os primeiros conceitos sobre máquinas elétricas lineares surgiram ainda no século XIX, onde no ano de 1841 já aparecia a primeira ideia sobre esse tipo de dispositivo, sendo um projeto desse tipo patentado no ano de 1890 (DEL TORO, 1985).

Embora sejam baseados nos mesmos princípios de operação, existem significativas diferenças entre atuadores elétricos lineares em relação aos análogos rotativos. Segundo Gieras, *et all* (2000), essas diferenças são fundamentalmente enumeradas conforme segue:

1. Fisicamente, os motores são diferentes. Existem simetrias características de máquinas rotativas que não são encontradas em máquinas lineares ou planares. Sendo assim, a distribuição do fluxo magnético no entreferro não é uniforme ao longo da trajetória que a máquina desenvolve, como se considera em máquinas rotativas. São os chamados efeitos de fim de curso.
2. O fluxo magnético em máquinas lineares não encontra um caminho fechado no estator como acontece nas máquinas rotativas.
3. Os atuadores lineares apresentam, em geral, fácil manutenção, reparos e reposição de peças e ainda tem a habilidade para poder desenvolver força no secundário com o mínimo possível de contato mecânico.
4. Quando se considera os efeitos de fim de curso, que as máquinas lineares têm, os controles de força e velocidade são mais complexos do que esses mesmos controles em máquinas rotativas.
5. Nas máquinas lineares é perceptível a existência de uma força normal entre o primário e o secundário que pode tanto ser usada para auxiliar na levitação, quanto pode carregar o sistema mecânico de sustentação do carro e afetar a sua dinâmica.

Quanto à topologia para atuadores lineares, elas são limitadas, muitas vezes, apenas pela criatividade do projetista, contudo elas são sempre obtidas a partir do princípio de funcionamento de uma máquina rotativa, uma vez que toda a máquina rotativa pode ter seu princípio convertido para uma máquina de propulsão linear. Sendo assim, quanto à classificação, os atuadores lineares podem ser divididos basicamente em:

1. Atuadores Lineares Síncronos.
2. Atuadores Lineares de Passo.
3. Atuadores Lineares de Corrente Contínua.
4. Atuadores Lineares de Indução.

Atuadores Lineares de Passo (ALP) são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos lineares de forma incremental. São similares aos de relutância chaveados. Quando devidamente controlados, o número de passos lineares do atuador é igual ao número de pulsos aplicados nas entradas elétricas do sistema. O sistema estrutural e de controle desse tipo de atuador é similar aos motores de passo rotativos, oferecendo ainda uma estrutura mecânica de montagem simples e robusta.

Os ALP têm suas aplicações limitadas a pequenos deslocamentos, contudo com passos muito pequenos (cerca de 100 μm), o que permite uma boa precisão em sistemas de posicionamento. Nessas condições, são frequentemente utilizados em controles microprocessados, como, por exemplo, periféricos de computadores. Essas máquinas têm a capacidade de operar em sistemas de laço aberto além de poderem ser alimentadas com tensão elétrica CA ou CC, requerendo controles elétricos simples. Como desvantagens citem-se: baixa eficiência; passo fixo de deslocamento em sistemas a laço aberto; capacidade limitada para transporte de cargas; potência limitada de saída.

Quanto aos princípios de operação, duas alternativas são interessantes: tipo relutância variável e tipo híbrido com ímãs permanentes. Das estruturas conhecidas e estudadas para esse tipo de dispositivo destacam-se as com excitação elétrica em multi-fases e com alinhamento de fluxo magnético pelo caminho de menor relutância magnética, como pode ser vista na Figura 2. É importante observar que esse tipo de dispositivo exige um sistema de controle dedicado. A força é diretamente proporcional à tendência de alinhamento do campo magnético no caminho de menor relutância, e a velocidade é proporcional à frequência do chaveamento das fases, sendo por esse motivo que o ALP tem sua velocidade variável e controlável em sistemas a laço fechado (GIERAS, et al, 2000), (MILLER, 1993).

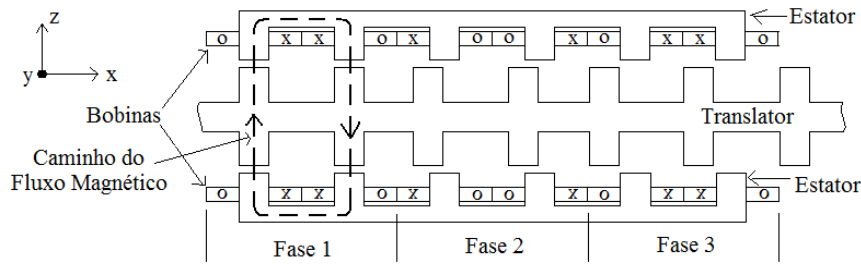


Figura 2: Motor linear de passo multi fases(DEL TORO, 1985).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desse trabalho está baseada primeiramente em um estudo teórico a cerca os fenômenos físicos, elétricos, mecânicos e magnéticos envolvidos na operacionalidade do dispositivo em estudo. Ainda contempla um estudo numérico e experimental, a partir da construção de um protótipo virtual e físico, para avaliar a densidade de fluxo magnético e a força planar de propulsão envolvidas na operacionalidade. O fluxograma da figura 3 apresenta a sequência de atividades que nortearam a construção do estudo, análise e desenvolvimento do MLP.

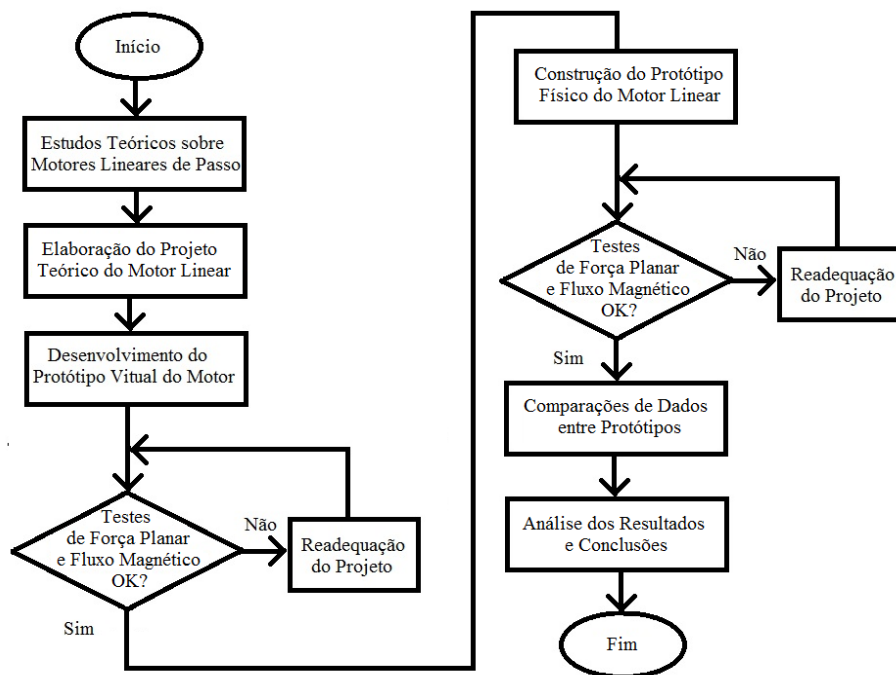


Figura 3: Fluxograma das atividades de estudo, análise e desenvolvimento do MLP.

2.1. O Motor Linear de Passo com Ímãs Permanentes

O motor linear de passo com ímãs permanentes estudado neste trabalho é um dispositivo eletromagnético de corrente contínua que desenvolve movimentação, através do translator (primário - carro), sobre a área de trabalho (secundário), com um grau de liberdade a partir de um único dispositivo de tração. Na forma como é proposto, representa uma alternativa para a construção de movimentações longitudinais com todas as vantagens que as configurações de atuadores lineares representam quando comparado com modelos arranjados com motores elétricos rotativos, geralmente utilizados pela indústria.

A Figura 4 ilustra, através de uma vista esquemática, as estruturas do primário e do secundário enquanto que a Tabela 1 apresenta as principais características. Ele apresenta uma estrutura externa de material não ferromagnético responsável pela sustentação do estator e um

sistema de suspensão para o carro formado por duas guias lineares e dois rolamentos lineares, que permitem a movimentação sobre o plano.

O secundário do dispositivo é formado por um núcleo ferromagnético de aço maciço, plano e não ranhurado sobre o qual são acopladas bobinas eletricamente independentes, formando um conjunto estatórico rígido. O primário consiste de um carro, também chamado de translator, que possui um núcleo de material ferromagnético onde fixados dois ímãs permanentes de Neodímio Ferro Boro (i.e., NdFeB) de alto produto energético.

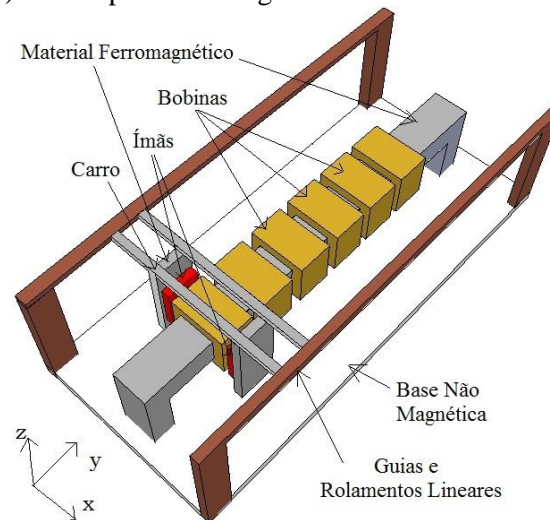


Figura 4: Motor linear de passo proposto e suas partes.

Tabela 1: Principais características do motor linear de passo.

Descrição	Quantidade
Número de ímãs permanentes	2
Número de bobinas	6
Número de espiras por bobina	250
Espessura do entreferro	7mm
Espessura do ímã permanente	8mm
Espessura da bobina	6mm
Área frontal do ímã permanente	25x25mm ²
Faixa de operação da corrente elétrica	0 – 2 Ampères

2.1.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do motor linear de passo com ímãs permanentes, caracterizado pelo movimento relativo do primário ao longo do secundário, está baseado na Lei de Lorentz que prevê que quando um condutor metálico de comprimento l percorrido por uma corrente elétrica i está imerso em um campo magnético, a força que atuará sobre ele é igual à soma das forças magnéticas que atuam sobre as cargas em movimento que constituem a corrente. A equação (1) pode ser escrita como (BASAK, 1996):

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

onde \vec{l} é o vetor cujo módulo é o comprimento ativo do condutor e cujos sentido e direção são paralelos a $q\vec{v}$. A equação (1) supõe que o condutor seja retilíneo e que a densidade de fluxo magnético seja constante em todo o seu comprimento, além de haver uma distribuição homogênea da corrente sobre o mesmo. Quando uma destas duas situações, ou ambas, não

forem satisfeitas, pode-se obter o diferencial de força $d\vec{F}$ que atua sobre um segmento infinitesimal de condutor $d\vec{l}$, por:

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B} \tag{2}$$

Ao invés de utilizar-se o segmento de condutor, pode-se utilizar o elemento de volume $dV = s_{af} dl$, considerando que $\vec{J}dV = id\vec{l}$, onde \vec{J} é o vetor densidade de corrente no condutor, aqui considerado uniforme através de sua área transversal (MILLER, 1993). O símbolo s_{af} representa a área da seção transversal de um condutor. Desta forma, no motor linear, a Força Linear de Propulsão que atua sobre os condutores das fases percorridas por corrente localizadas sob o ímã permanente N , pode ser obtida pela lei de Lorentz através da equação (3) (SILVEIRA, 2003).

$$\vec{F}_N = \int_{V_N} \vec{J}_N \times \vec{B}_{gN} dV_N \tag{3}$$

A equação (3) permite determinar o módulo e o sentido da força que atua sobre os condutores percorridos por corrente, imersos no campo magnético do ímã permanente. No motor linear, os condutores são estacionários, enquanto que os ímãs permanentes, fontes do campo magnético, estão localizados no carro, possuindo liberdade para movimentar-se. Assim, a força produzida entre os condutores percorridos por corrente e o campo magnético provocará o deslocamento do carro e, por conseguinte, do campo magnético, sobre o plano. Para determinar o sentido da força que atua sobre o carro, a equação (3) é modificada para a equação (4). A produção de força é ilustrada na Figura 5 (NASAR, et al, 1987).

$$\vec{F}_N = \int_{V_N} -(\vec{J}_N \times \vec{B}_{gN}) dV_N = \int_{V_N} (\vec{B}_{gN} \times \vec{J}_N) dV_N \tag{4}$$

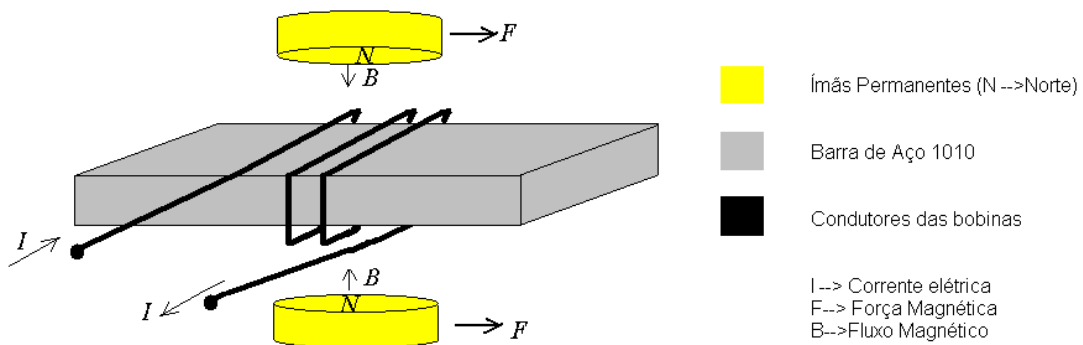


Figura 5: Princípio de funcionamento e produção de força de tração do motor linear de passo.

A força máxima é produzida quando os ímãs permanentes estão completamente alinhados com a bobina que está sendo excitada, sendo que o sentido que a corrente é aplicada nas bobinas determina o sentido do deslocamento da parte móvel ao longo do eixo x . A velocidade de movimentação está relacionada com a frequência de chaveamento das bobinas, logo, como as bobinas são eletricamente independentes é possível alterar a velocidade de translação, em diferentes posições e alterar a força de tração, como função da corrente. A Figura 6 mostra o esquema para produzir essa força.

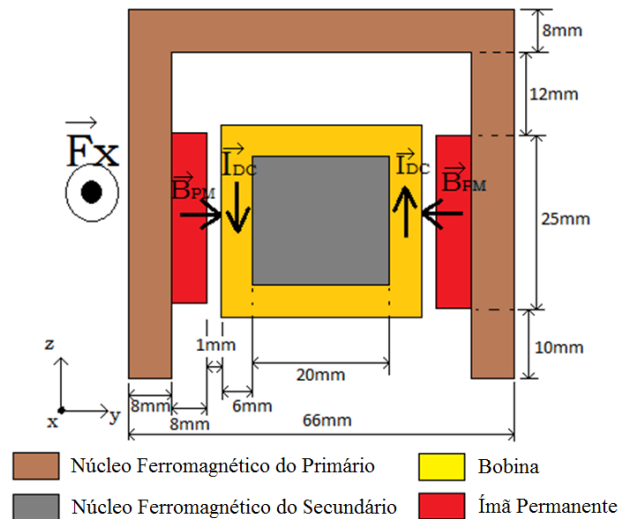


Figura 6: Vista frontal do motor linear e a indicação dos vetores da força, corrente e campo magnético.

Como pode ser observado, o campo magnético gera uma força. É importante comentar que os dois ímãs permanentes se encontram em oposição. Isso se deve ao fato de que a corrente em um dos lados da bobina desenvolve o movimento vertical de subida e do outro lado, movimento vertical de descida. Teve-se o cuidado de fazer com que as forças se somassem, logo, a disposição é apresentada desta maneira, como é visto na Figura 6.

2.2. Análise Numérica

A análise através de simulação numérica do motor linear de passo compreende a verificação de fenômenos mecânicos e magnéticos envolvidos na operacionalidade do dispositivo. Esta análise objetiva estudar o comportamento estático e dinâmico, dando foco à distribuição da densidade de fluxo magnético e a força planar de propulsão linear. Para essa análise será utilizado o método dos elementos finitos (MEF) através de um *software Ansoft Maxwell 13*, específico para simulações eletromagnéticas.

O MEF apresenta seus desenvolvimentos e soluções a partir de um *software* específico nas suas funcionalidades para o tipo de problema que se deseja obter resultados. Sendo assim, as simulações neste trabalho são obtidas através de um pacote computacional que trata especificamente de soluções para dispositivos eletromagnéticos através de modelagem 3D.

Uma vista do modelo virtual do motor é apresentada na Figura 7. O total de números de elementos finitos é 125.365, gerando um total de 145.546 equações diferenciais para a solução.

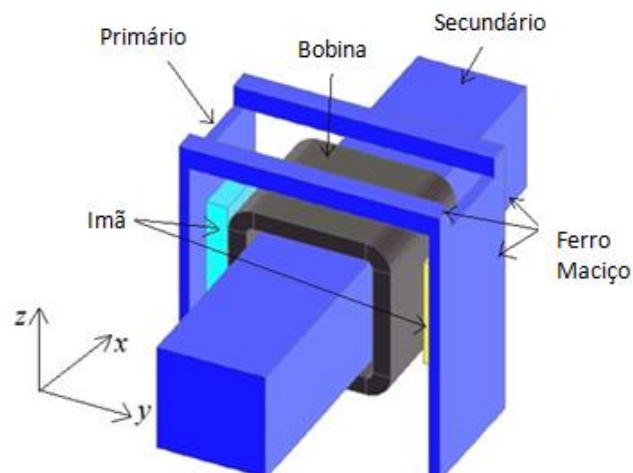


Figura 7: Protótipo 3D do modelo virtual construído.

A densidade de fluxo magnético é analisada na região do entreferro, na região entre o ímã permanente e a bobina, quando os ímãs estão perfeitamente alinhados com a bobina que irá receber a excitação eletromagnética. Esses resultados são processados ao longo da linha de amostragem, como apresentado na Figura 8; o comportamento da densidade de fluxo magnético é apresentado a 0,5mm da face polar do ímã.

Também, a força planar é computada usando o Tensor de Stress de Maxwell em função da excitação elétrica, em corrente contínua, aplicada na bobina. Todos os resultados são processados sem e com corrente nas bobinas e apresentados juntamente com os resultados experimentais para que uma análise comparativa seja possível.

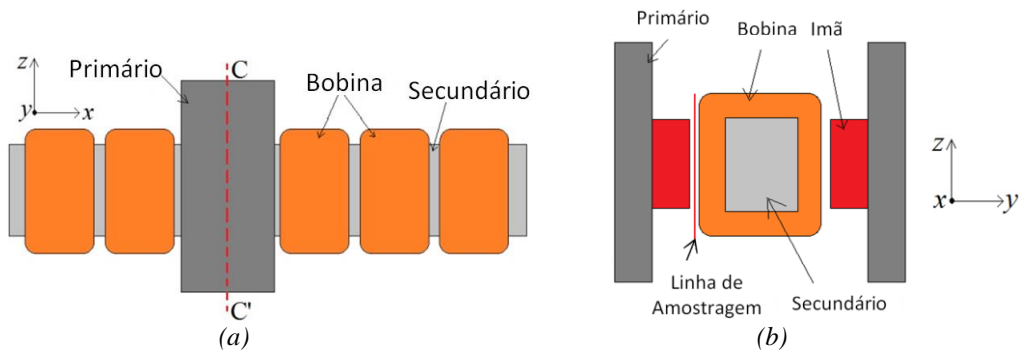


Figura 8: Representação da região de análise: (a) vista frontal; (b) vista em corte C-C'.

2.3. Testes

Os resultados experimentais foram obtidos da construção física do protótipo, Figura 9. Estes resultados foram validados por meio dos resultados numéricos. Ficou definido que a corrente elétrica aplicada em cada uma das bobinas variava de zero até dois Ampéres. Cada ensaio experimental teve seus valores de força planar e densidade de fluxo magnético comparado com os resultados obtidos na análise numérica, mantendo as mesmas características.

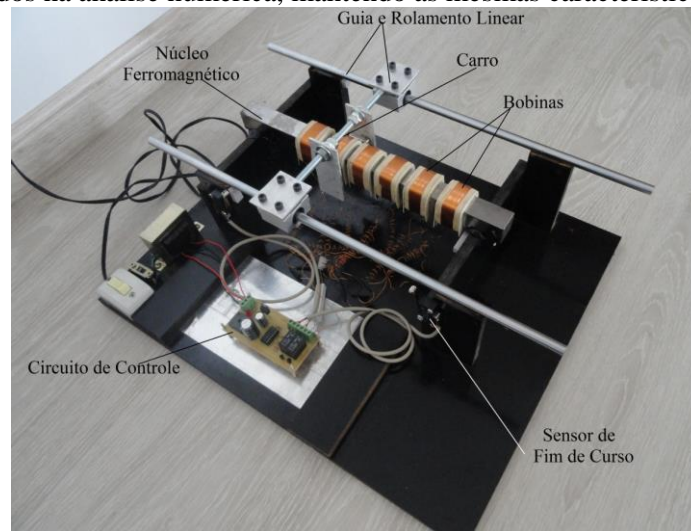


Figura 9: Protótipo físico do motor linear de passo.

A força de tração linear para as medições são obtidas fazendo uma configuração com célula de carga (sensor de carga) e condicionador de sinal, a corrente aplicada nas bobinas é aplicada a partir da fonte DC controlável. A densidade de fluxo magnético ao longo das linhas de amostragem (Figura 8) é monitorada nas mesmas condições que os resultados numéricos, e para obtenção dos resultados foram utilizados sensores de Efeito Hall¹.

¹ O Efeito Hall está relacionado ao surgimento de uma diferença de potencial em um condutor elétrico, quando neste, transversal, existe um fluxo de corrente elétrica, imersa em campo magnético perpendicular a corrente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a apresentação, os resultados são divididos em duas partes: densidade de fluxo magnético na região do entreferro e força planar de propulsão linear. Estas duas grandezas foram descritas em função da excitação eletromagnética e da posição do ímã permanente em relação a bobina que recebe excitação elétrica.

3.1. Densidade de Fluxo Magnético

A densidade de fluxo magnético é processada ao longo da linha de amostragem, conforme Figura 8. Numericamente os resultados são obtidos baseados no método dos elementos finitos e experimentalmente, utiliza-se uma ponteira de Efeito Hall. Os resultados comparativos são mostrados na Figura 10, em função da excitação elétrica aplicada nas bobinas.

É possível verificar, quando a corrente elétrica na armadura é aumentada, também é aumentado o efeito de reação da armadura, contudo esse efeito, não causa significativa diferença no valor médio da densidade de fluxo magnético, ficando seu valor em 0,332T.

Com a ajuda da Figura 11, que apresenta a distribuição da densidade de fluxo magnético de forma diagramada, foi possível perceber que a densidade não é maior que a densidade de saturação do material ferromagnético, em função da variação de corrente elétrica que é aplicada na bobina.

Para completar a análise acerca do efeito de reação da armadura, na Figura 12 são apresentados gráficos tridimensionais da distribuição da densidade de fluxo magnético em uma área frontal a um dos ímãs permanentes, distante 0,5mm deste, em função da variação de corrente elétrica na bobina em que esse ímã esta completamente alinhado.

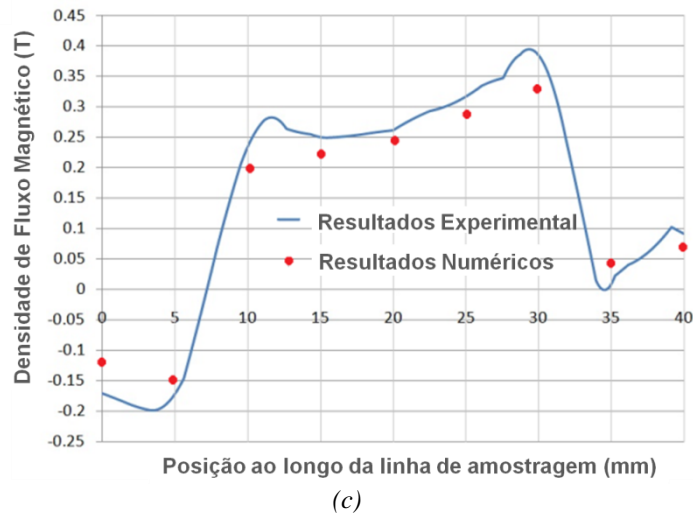
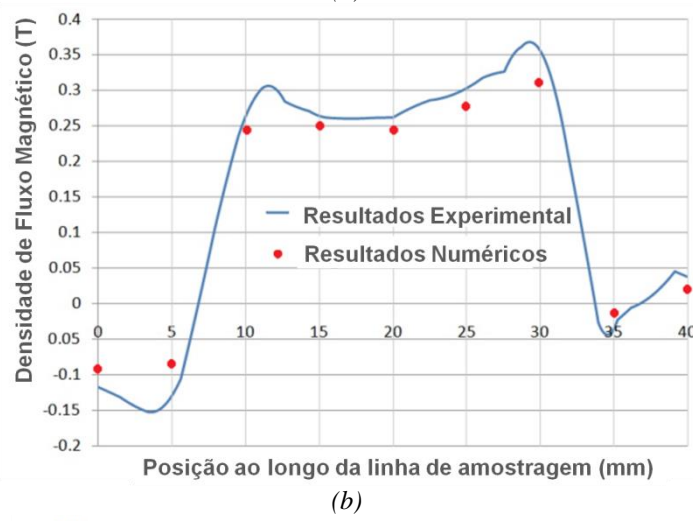
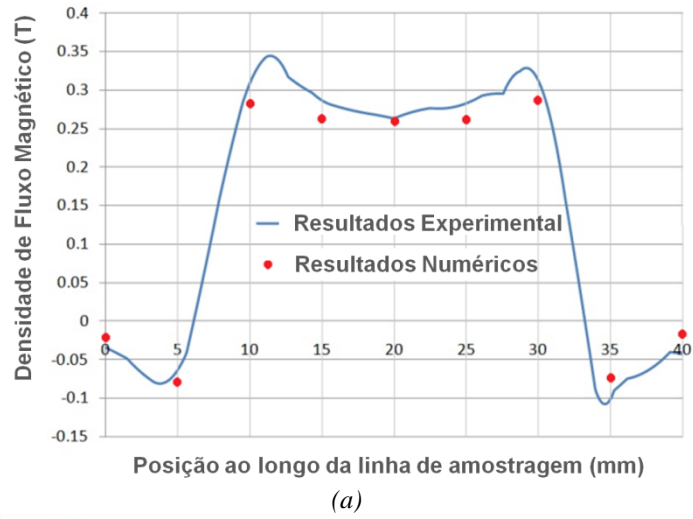


Figura 10: Densidade de fluxo magnético ao longo da linha de amostragem com excitação na bobina de (a) zero Ampères; (b) um Ampère e; (c) dois Ampères.

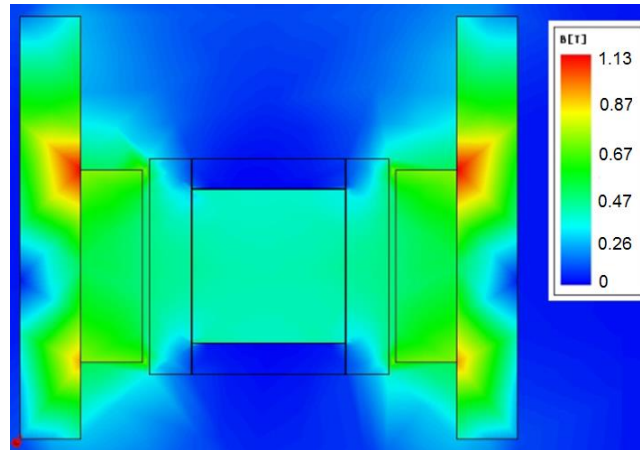
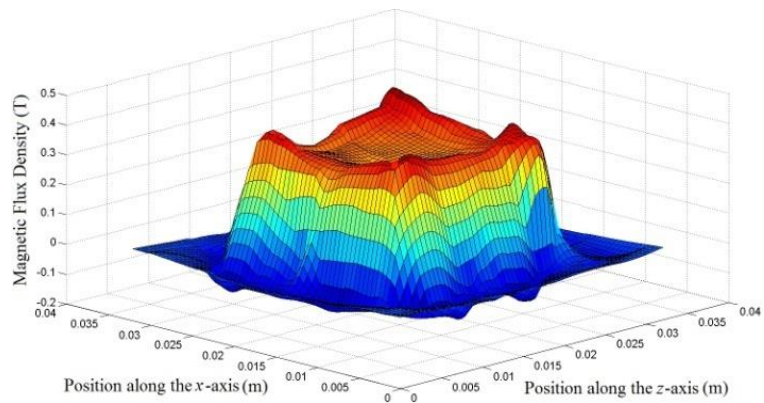
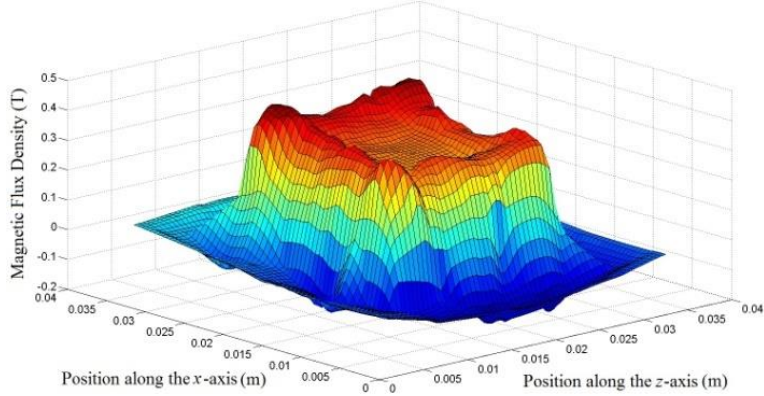


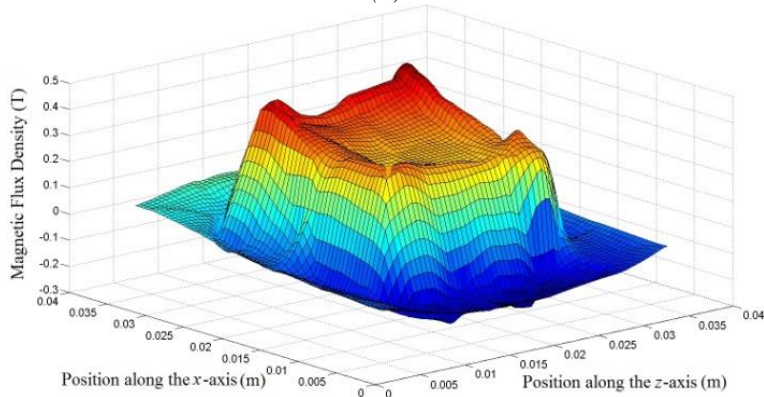
Figura 11: Fluxo magnético na região mostrada na figura 7(b), vista frontal.



(a)



(b)



(c)

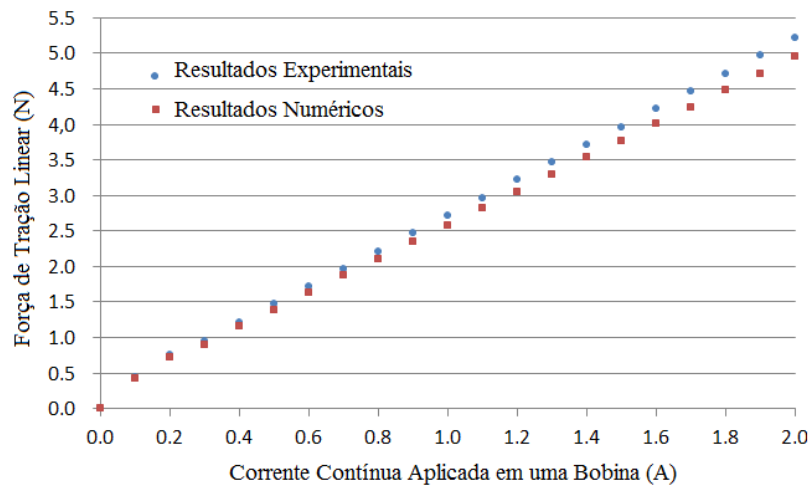
Figura 12: Distribuição da densidade de fluxo magnético na região a 0,5mm da face polar de um dos ímãs permanentes com excitação na bobina de: (a) zero Ampères; (b) um Ampère e; (c) dois Ampères.

3.2 Força Linear de Tração

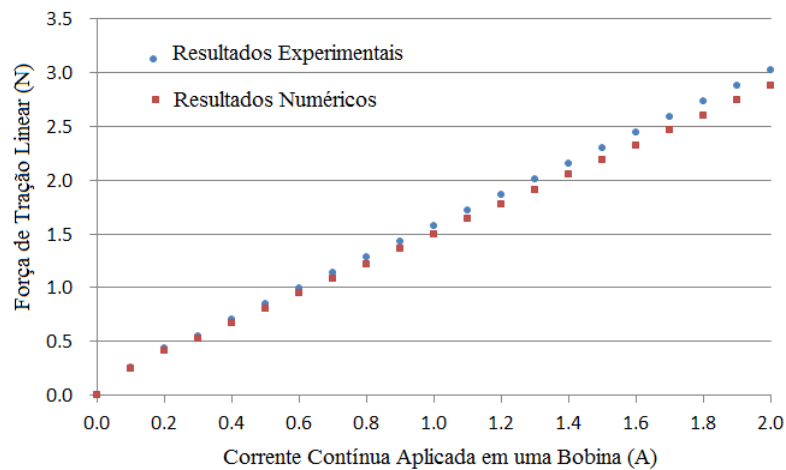
A força linear de tração, responsável pela operação do dispositivo eletromagnético é aqui analisada, em função da corrente elétrica aplicada na bobina, para duas situações:

1. Quando os ímãs permanentes estão em perfeito alinhamento com a bobina que recebe excitação elétrica;
2. Quando os ímãs permanentes estão 50% alinhados com a bobina que recebe excitação elétrica.

A figura 13 mostra estes resultados.



(a)



(b)

Figura 13: Força de tração linear em função da corrente de excitação em uma bobina quando o ímã permanente está: (a) 100% alinhado com a bobina e (b) 50% alinhado com a bobina.

4. CONCLUSÃO

O motor eletromagnético proposto neste trabalho apresentou uma solução alternativa para aplicações industriais que requerem alta velocidade em movimentos lineares possuindo um controle simples e muito flexível. Também foi possível constatar uma relação muito próxima entre os resultados numéricos e experimentais e dessa forma validar os resultados obtidos. Por exemplo, a maior diferença percentual entre valores simulados e experimentais é de 4,7%

quando o ímã permanente está completamente alinhado com a bobina e de 4,1% quando está 50% alinhado.

O fato de a força planar estar diretamente relacionada com a corrente elétrica de excitação das bobinas contribui positivamente na elaboração de um sistema de controle para monitorar e acionar o dispositivo.

Foi possível observar que a força de tração planar apresenta um comportamento aproximadamente linear nas condições testadas, o que vai ao encontro do que prevê a Lei de Lorentz quando os materiais ferromagnéticos não estão trabalhando em saturação. O uso de ímãs de alta densidade de energia, como os de NdFeB apresentados neste trabalho, torna possível a construção de motores com boa relação entre a força e corrente sem o uso de escovas.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é um dos resultados de um projeto de pesquisa em desenvolvimento no Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Câmpus Farroupilha, financiado com verba de fomento interno (Edital PROPI N° 015/2012 – Fomento 2013/2014), por onde passa os meus agradecimentos.

-
1. Baggio Filho NF. Desenvolvimento de Um Motor Linear de Corrente Contínua, Brushless, com Ímãs Permanentes. Canoas. 2005. 145f. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Canoas: ULBRA; 2005.
 2. Baggio Filho NF. Estudo e Desenvolvimento de um Atuador Planar com Enrolamentos Planificados e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito. Porto Alegre. 2008. 189f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre: UFRGS; 2008.
 3. Basak A. Permanent-Magnet DC Linear Motor. Oxford: Oxford Science Publications; 1996.
 4. Del Toro V. Electric Machines and Power Systems. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs; 1985.
 5. Gieras JF, Piech ZJ. Linear Synchronous Motors: transportation and automation systems. Londres: CRC Press; 2000.
 6. Miller TJ. Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Oxford: Clarendon Press; 1993.
 7. Nasar SA, Boldea I. Linear Electric Motor: theory, design and applications. New Jersey: Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1987.
 8. Silveira MA. Estudo de um Atuador Planar. Porto Alegre. 2003. 225f. Tese (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Porto Alegre: UFRGS; 2003.