

# ASPECTOS DO MOTOR DE FLUXO AXIAL E A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS

ARANHA, Raphael Silva ; SANTOS, Euler Bueno dos

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás  
E-mails: *raphaelsaranha@yahoo.com.br*  
*ebs@eee.ufg.br*

Palavras-chave: Motor, Fluxo-axial, Ímã Permanente, Elementos Finitos.

## 1. INTRODUÇÃO

Pesquisadores da área de veículos automotores têm-se preocupado com as questões relativas aos combustíveis. Pesquisas têm sido direcionadas no sentido de utilizar um combustível que preserve o meio ambiente. Assim sendo, a utilização de fontes renováveis de energia sem provocação de impactos ambientais tem sido alvo de estudos, destacando a utilização da energia solar. Este, por sua vez, não injeta na atmosfera gases poluentes como aqueles originados dos combustíveis fósseis [3]. Os motores de fluxo axial a ímã permanente (AFPM) podem ser empregados perfeitamente dentro das pretensões expostas.

A pesquisa em desenvolvimento tem como objetivo apresentar o motor de fluxo axial, levando em consideração os aspectos construtivos, vantagens, desvantagens, bem como o desenvolvimento de uma técnica de acionamento para o referido motor. Este trabalho apresenta alguns aspectos do motor de fluxo axial desenvolvido. São utilizados dados desse motor para obtenção de grandezas, através de simulação empregando a técnica de elementos finitos.

A máquina a ser analisada é constituída de um rotor em formato de disco contento ímãs permanentes de terra rara e com um estator, também em formato de disco, sendo construído por chapas de aço ao silício de grãos não orientados (GNO).

i

## 2. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho baseia-se na filosofia do estudo teórico-experimental. Para a obtenção de dados serão utilizados um sistema de aquisição de dados cuja placa é da *Data Translation*, contando ainda com a utilização de sensores de velocidades e sensores de *Efeito Hall*.

## 3. MÁQUINA DE FLUXO AXIAL

Diversas configurações da máquina de fluxo axial podem ser idealizadas, considerando a posição do estator(es) e a posição do rotor(es), bem como aos arranjos do enrolamento que dão liberdade para selecionar a estrutura mais apropriada da máquina observando determinada aplicação. Apesar de possuir várias configurações, duas características são evidentes em todos os modelos, atribuindo a esta categoria o seu nome: a) o fluxo trafega no sentido axial e b) possui ímãs permanentes no rotor [2]. Assim, as estruturas podem ser: estrutura com um rotor e um estator; estrutura em que o estator é situado entre os rotores; estrutura em que o rotor é posicionado entre os estatores; estrutura de vários estágios incluindo diversos rotores e estatores [1].

Essas máquinas são diferentes das máquinas elétricas convencionais nos termos do sentido do fluxo, o qual é estabelecido paralelamente ao eixo mecânico da máquina. A corrente que trafega cada bobina do estator interage com o fluxo criado pelos ímãs no rotor, produzindo uma força tangencial à circunferência do rotor.

A utilização dessas máquinas é viável por apresentar construção compacta; elevada potência; não possui perdas do cobre no rotor devido à existência de ímãs permanentes; estrutura mais robusta [2]. Em contra partida, possui elevadas perdas no enrolamento em aplicações com elevada velocidade.

#### 4. MOTOR

O rotor do motor, objeto desse estudo, é constituído de 12 ímãs permanentes de Terra Rara, cujo material de fabricação é Nd-Fe-B (Neodímio-Ferro-Boro), sendo que, o estator possui 36 dentes em que a extensão das bobinas ocupará um passo polar. O motor possui 3 fases e um total de 12 pólos. Ressalta-se o fato de que os ímãs presentes no rotor possuem polaridades diferentes, ou seja, existe um conjunto de seis ímãs com o norte magnético exposto, e outros seis ímãs com o pólo sul magnético exposto, sendo todas dispostas de forma intercalada.

A Fig.1 (a) apresenta o rotor com a distribuição dos ímãs permanentes em sua superfície e a Fig 1 (b) o estator contendo 36 dentes.

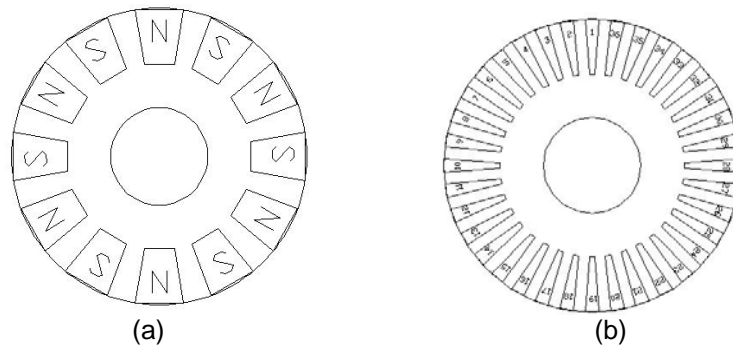


Figura 1: Rotor com 12 ímãs permanentes e estator com 36 ranhuras

#### 5. FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do motor de fluxo axial é baseado no princípio de atração e repulsão dos pólos magnéticos devido aos fluxos provenientes dos ímãs com o fluxo gerado pelas bobinas. Quando um conjunto de enrolamentos do estator é excitado, os pólos do rotor são atraídos para uma posição que resulte em alinhamento dos pólos. Assim, quando um enrolamento é alimentado, o conjugado resultante moverá o rotor em um determinado sentido, podendo ser este no sentido horário ou anti-horário, e em direção a posição de alinhamento dos pólos. Se o rotor passar da posição de alinhamento, devido à sua inércia, a força de atração entre os pólos produz um conjugado negativo. Para eliminar este conjugado negativo, a corrente deve ser zerada antes dos pólos se alinharem. Através da excitação dos enrolamentos do estator de diferentes fases, a cada momento, um conjunto de pólos do rotor aproxima-se dos respectivos pólos do estator, produzindo um conjugado pulsante e a rotação do rotor é assim estabelecida [5].

A necessidade de comutação apropriada no sinal da alimentação torna necessário um módulo de potência para sua alimentação. Um controle baseado na determinação da posição do rotor é necessário para o funcionamento do motor. Portanto, as fases ao serem excitadas com correntes, à permanência delas deve ser cuidadosamente relacionada com a posição dos pólos do rotor para produzir um conjugado médio útil [5].

## 6. ELEMENTOS FINITOS

O Método de elementos finitos (MEF) pode ser utilizado para analisar o comportamento eletromecânico de dispositivos eletromagnéticos, sendo este, essencialmente uma ferramenta de análise e não de projeto. Um modelo baseado em elementos finitos bem elaborado pode produzir resultados numéricos com boa precisão, se as características  $B \times H$  dos materiais envolvidos, especialmente os ímãs permanentes, forem conhecidos.

Conforme mencionado, o material do ímã presente no motor em questão é Nd-Fe-B, portanto, necessário o conhecimento da sua curva BH. Os valores adotados da curva são: campo coercitivo ( $H$ ) igual a 650 KA/m para  $B$  igual a zero, e densidade de fluxo remanescente ( $B$ ) igual a 0,9 T, para  $H$  igual a zero. A permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ), ou seja, sua inclinação da curva BH, é de 1,1.

## 7. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Para realizar os estudos baseados na técnica de elementos finitos, utilizou-se o programa *Flux 2D*, sendo necessário a linearização da geometria do motor. A simulação é realizada em duas dimensões. Dessa forma utilizou-se o método de equivalência de área para linearizar o motor.

Esse processo consiste em calcular a área do ímã, e a área do dente do estator. Feito o cálculo, estabelece-se um valor de referência que, neste caso, foi a altura do ímã (o qual se apresenta no formato de trapézio isóscele) e dividi-se a área pelo valor de referência montando assim uma nova geometria, que no caso é retangular. Tal procedimento é realizado para todas as áreas envolvidas. A nova configuração ilustrada na Fig.2 apresenta a vista superior do modelo implementado no programa *Flux2D*.

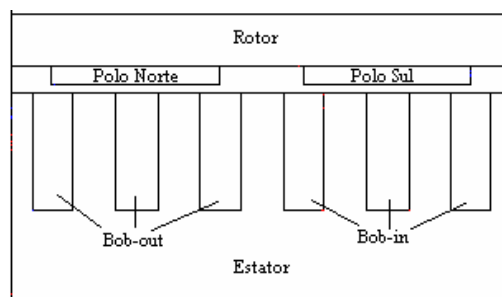


Fig.2: Representação esquemática do motor

## 8. RESULTADOS

Determinadas as características físicas da máquina, a primeira simulação realizada foi com o motor desenergizado, ou seja, contendo apenas a distribuição magnética devido aos ímãs permanentes. A Fig.3(a) apresenta o comportamento da

distribuição das linhas magnéticas no rotor e no estator em função dos ímãs presentes no rotor. De posse do comportamento da curva de indução magnética para o motor desenergizado, é necessário energizar uma fase do motor a fim de se realizar outras análises. Assim, a Fig.3(b) representa o comportamento da distribuição das linhas magnéticas no rotor e no estator em função dos ímãs permanentes e da fase energizada

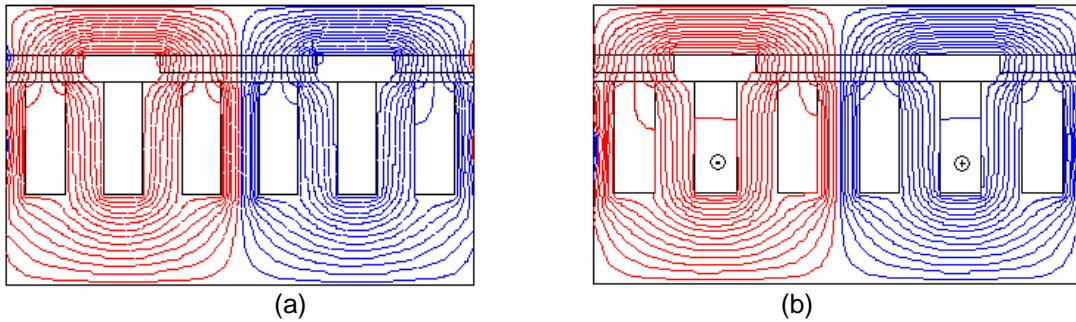


Figura 3: (a) - Distribuição magnética dos ímãs permanentes (b) - Distribuição magnética com uma fase energizada

Para realizar as análises da geometria proposta, os ímãs foram deslocados até que se encontrassem na situação em que o pólo sul esteja na região central setor do estator, e o pólo norte nas extremidades desse setor.

Observando a Fig.3(b) verifica-se que mesmo energizando uma fase, conforme apresenta a figura, as distribuições das linhas de indução magnética continuam concentradas nos ímãs. A fase energizada é indicada apresentado o sentido da direção da corrente através dos pequenos círculos.

Estando as fases desenergizadas obteve-se a curva de indução magnética ao longo do entreferro, observado na Fig 4(a). Outro aspecto a ser analisado pelo MEF é a verificação do comportamento da força gerada pelo motor conforme mostra a Fig. 4(b).

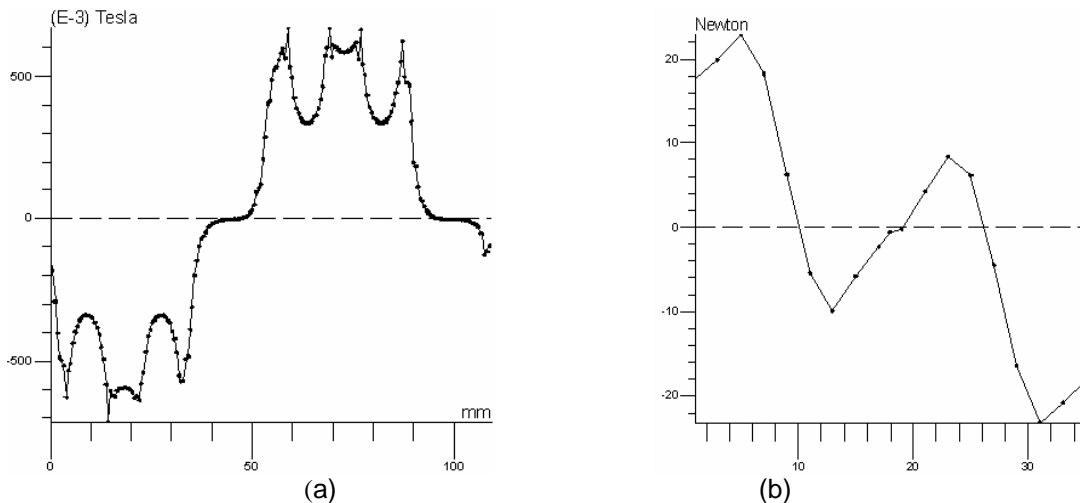


Figura 4: (a) - Indução magnética no entreferro. (b) - Força no rotor

Ressalta-se o fato de que, para cada posição do ímã haverá um comportamento diferente da curva. Contudo, a Fig.4(a) apresenta a curva de indução magnética obtida para a posição referente à Fig.3(a).

A Fig.4(b) apresenta o comportamento da força para cada posição adotada dentro de um determinado intervalo. Essa curva evidencia a importância de se saber a posição dos ímãs, pois, como observado em alguns pontos, a força gerada é positiva, tendo seu valor máximo de aproximadamente 23N. Assim o correto chaveamento das fases faz-se necessário para que o motor trabalhe sempre na região em que a força possua módulo positivo.

O valor de 23N corresponde à força para um pólo (norte-sul), e o motor possui um total de 12 ímãs dando um total de 6 pares de pólos, logo, a força total alcançada pelo motor será 138N. Realizado o cálculo da força obtem-se o torque (T) do motor. Assim o resultado é de 15,18 N.m..

#### **4. CONCLUSÃO**

Apesar dos resultados obtidos serem através de simulação, os mesmos estão próximos dos valores esperados (valores de projeto). Portanto estes servirão como base para comparação com resultados de ensaios.

O motor se constitui em uma máquina robusta e compacta com desempenho satisfatório.

#### **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] D.P.Patterson, "The Design, and Developed of an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Wheel Drive in a solar Powered Vehicle"Proceedings, IEEE IAS'94, Denver Colorado, October 1994;
- [2] G.H.Chen, "Design of a Permanent-magnet Direct-driven Wheel Motor Drive for Electric Vehicle";
- [3] VIII ENCONTRO REGIONAL LATINO-AMERICANO DA CIGRÉ, A Inserção Do Veículo Elétrico No Planejamento Estratégico Das Empresas De Energia, 30 de maio a 03 de junho, Cidade do Leste, Paraguai
- [4] Parviainen, Asko. Design of Axial-flux Permanent-magnet Low-speed Machines and Performance Comparison Between Radial-flux and Axial-flux Machines. 2005. Dissertação Doutorado. Acta Universitatis Lappeenrantaensis.
- [5] T.T.Borges, "Motor aRelutância Chaveado com Controle Fuzzy e detecção Indireta de Posição", Tese de Doutorado, UFU, Julho de 2002.