

UMA PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE ATUADOR ELETROMAGNÉTICO ESFÉRICO COM IMPLEMENTAÇÃO EM ARTICULAÇÕES BIOMECÂNICAS

Nestor José Pimenta Neves Junior (Estudante de Mestrado), Laboratório de Máquinas Elétricas e Eletromagnetismo Aplicado da Universidade Federal de Uberlândia, nestorjunior.eel@gmail.com
Luciano Martins Neto (Professor Orientador), Laboratório de Máquinas Elétricas e Eletromagnetismo Aplicado da Universidade Federal de Uberlândia, lmn@ufu.br

Resumo. Este trabalho apresenta uma proposta de desenvolvimento de um atuador eletromagnético concebido a partir de um rotor esférico com três graus de liberdade. O objetivo principal é avaliar a viabilidade construtiva e operacional de um mecanismo capaz de realizar posicionamento angular de precisão. O dispositivo inclui duas partes: uma peça móvel acoplada a um ímã permanente de alta densidade energética, rotor, e uma estrutura estacionária constituída de três enrolamentos concentrados montados sobre um núcleo ferromagnético em posições ortogonais entre si, estator. O princípio de funcionamento baseia-se na interação magnética entre o campo resultante gerado pelas correntes injetadas nos enrolamentos do estator e o campo proveniente do ímã permanente fixado no interior da peça móvel. Devido à característica de alimentação independente dos três enrolamentos do estator e de algumas peculiaridades construtivas, pode-se prever uma série de vantagens funcionais deste dispositivo em relação a outros atuadores eletromagnéticos comumente utilizados, tais como os servos e motores de passo. Por exemplo, redução de tamanho e número de elementos de máquinas, simplicidade e robustez construtivas, possível ausência de engrenagens, alta eficiência, vida útil prolongada, baixo momento de inércia e confiabilidade operativa. No intuito de validar a proposta de projeto do atuador esférico, tornou-se necessário a elaboração de estudos sobre geometria construtiva, modelagem computacional 3D, modelagem matemática e estratégia de controle do equipamento. Este conceito de atuador eletromagnético é tratado como 'motor esférico' ao longo deste trabalho. Sob o contexto de biorrobótica, salienta-se a possibilidade de implementação do motor esférico em sistemas biomecânicos, emulando satisfatoriamente estruturas, tais como, visão e articulações do punho, pescoço, ombro e quadril.

Palavras chave: atuador eletromagnético, motor esférico, articulação biomecânica, ímã permanente, modelagem

1. INTRODUÇÃO

Em robótica, os motores elétricos tornam-se os principais atuadores em aplicações que exigem posicionamento preciso de cargas. Os servos e motores de passo são os atuadores eletromagnéticos rotativos mais utilizados e caracterizam-se por deslocamentos angulares discretos com apenas um grau de liberdade (KENJO; SUGAWARA, 1995). Desse modo, a implementação de um mecanismo com múltiplos graus de liberdade implica na utilização de um motor a cada grau e, conseqüentemente, o sistema mecânico de transmissão de torque à carga torna-se complexo.

O objetivo geral do presente trabalho consiste em avaliar a viabilidade de desenvolvimento de um atuador eletromagnético rotativo, cujo rotor, em formato esférico, destina-se ao posicionamento preciso de cargas. O 'motor esférico', em sua concepção teórica, caracteriza-se pela robustez construtiva e torna-se independente de sistemas mecânicos de transmissão de forças entre o eixo e a carga. Contudo, apresenta-se a proposta de desenvolvimento de uma máquina de alta eficiência, baixo momento de inércia, vida útil prolongada, com alta confiabilidade de operação e custos reduzidos de aquisição e manutenção.

O motor esférico apresenta um grande número de aplicações vinculadas à automação de máquinas e equipamentos, entre as quais se destacam juntas de articulação para braços robóticos em geral, bem como emulação de sistemas biomecânicos, tais como: olho humano, punho, pescoço, ombro e quadril. Ou ainda, manipuladores industriais do tipo "máquina-ferramenta", utilizados em montagens de precisão e fabricação de peças. A Figura (1) mostra um esboço de um manipulador robótico com duas juntas esféricas em série.



Figura 1. Esboço de manipulador robótico

2. GEOMETRIA CONSTRUTIVA

O **rotor** constitui-se em uma casca esférica abrigando em seu interior um único ímã permanente cujo eixo de magnetização coincide com o eixo (d) principal de posicionamento do motor. As possibilidades de geometria construtiva do rotor são apresentadas na Fig. (2).

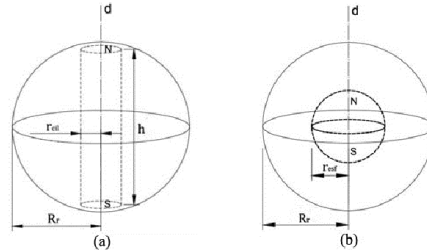


Figura 2. Alternativas construtivas para o ímã permanente do rotor esférico. (a) Ímã cilíndrico (b) Ímã esférico

Os ímãs de NdFeB entraram no mercado a partir da década de 80 e merecem destaque devido às suas excelentes propriedades magnéticas. As ligas de *neodímio-ferro-boro* apresentam as mais elevadas densidades volumétricas de energia disponíveis na atualidade e, desse modo, o volume de material necessário para a produção de certa densidade de fluxo magnético é menor (JULIANI, 2007). Torna-se conveniente empregar o NdFeB, no intuito de reduzir o tamanho e a inércia da peça móvel a partir dos efeitos de compactação eletromagnética.

O **estator** é composto de 3 enrolamentos concentrados, os quais serão identificados pelas letras "a", "b" e "c", e dispostos, a priori, em posições ortogonais entre si. Para auxiliar na formulação matemática da geometria do modelo, seus eixos magnéticos são direcionados, respectivamente, no sentido positivo dos eixos x , y e z . E não obstante, considera-se, em um primeiro momento, que as bobinas são cilíndricas, com faces polares planas e núcleo de material ferromagnético (MENDES; MARTINS NETO, 1996). A Figura (3) mostra a disposição das partes constituintes do estator no espaço, onde as extremidades das faces das bobinas são representadas por circunferências tangenciadas pelos eixos coordenados e pertencentes aos planos yz , zx e xy .

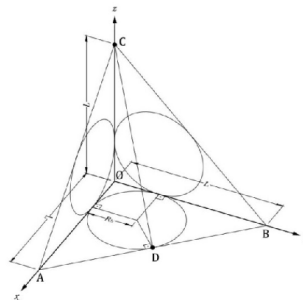


Figura 3. Posicionamento das bobinas do estator no sistema cartesiano xyz

O rotor esférico é alocado no primeiro octante do espaço cartesiano de modo que o plano ABC efetue uma secção semicircular da esfera de raio R_r e, contudo, o segmento de reta \overline{DC} atravesse o seu centro (C_r). Portanto, a região espacial disponível para o posicionamento do motor limita-se à superfície correspondente a um hemisfério.

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem 3D, por meio da ferramenta CAD (*Computer Aided Design*), é utilizada para auxiliar na análise de viabilidade da montagem, de acordo com os aspectos construtivos de projeto do motor.

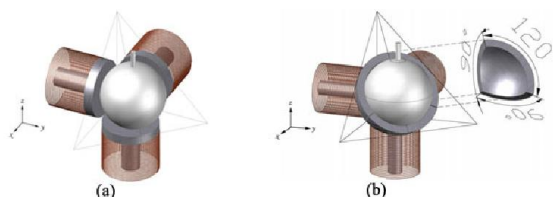


Figura 4. Modelos 3D. (a) Face polar plana e (b) Face polar esférica

A Figura (4.a) mostra o primeiro esboço 3D da estrutura principal do dispositivo, onde pode-se observar o emprego de bobinas com faces polares planas. Enquanto que a Fig. (4.b) mostra uma otimização do modelo, em que as faces polares das bobinas foram redesenhadas no formato de triângulos esféricos e justapostas para formar uma casca semi-esférica de estator que envolve o rotor e garante uma espessura de entreferro constante em toda a área de superfície de um hemisfério.

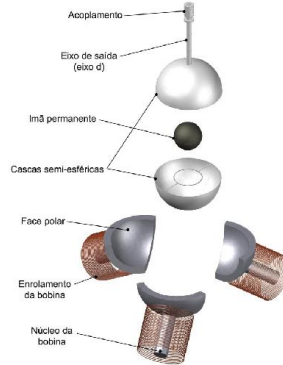


Figura 5. Visão explodida dos elementos de estator e rotor

A Figura (5) permite uma visualização explodida, em perspectiva, dos elementos que constituem o estator e o rotor da máquina esférica. Pode-se observar que somente a parte mais externa dos enrolamentos foi representada por uma estrutura helicoidal, no intuito de possibilitar uma visualização do núcleo ferromagnético cilíndrico interno das bobinas. Verifica-se que o modelo foi rotacionado, de modo que a referência para o posicionamento do rotor torna-se o eixo de simetria dos enrolamentos ortogonais do estator.

4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E MODELAGEM MATEMÁTICA

As bobinas ortogonais "a", "b" e "c" são alimentadas em corrente contínua para produzir o campo magnético resultante do estator. A posição espacial desse campo é função dos valores relativos entre cada uma das correntes injetadas nos enrolamentos e determinante no posicionamento do eixo mecânico principal da máquina. O rotor apresenta três graus de liberdade de rotação e seu deslocamento angular deve-se a interação eletromagnética entre o ímã permanente fixado no seu interior e as bobinas alocadas no estator.

O torque eletromagnético (\vec{T}) é a grandeza vetorial que traduz a tendência de alinhamento dos campos magnéticos resultantes do estator e do rotor e, sob a perspectiva do princípio de funcionamento do motor em questão, pode ser definido pelo produto vetorial (HAYT; BUCK, 2003):

$$\vec{T} = \vec{m}_d \times \vec{B} \tag{1}$$

Onde \vec{m}_d é o momento magnético do ímã permanente e \vec{B} a densidade de fluxo magnético resultante do estator.

4.1. Método da corrente magnetizante equivalente

Este método consiste na substituição do ímã permanente por um volume de permeabilidade magnética μ_0 , em cuja superfície dispõe-se um enrolamento de N_d espiras, percorrido por uma corrente magnetizante equivalente i_d (BOTELHO, 2008).

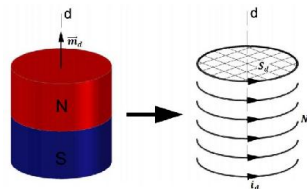


Figura 6. Modelo de representação do ímã por corrente magnetizante

Definindo-se o vetor unitário (\vec{a}_d) paralelo ao vetor de magnetização do ímã, o momento magnético do ímã pode ser representado pela expressão de equivalência:

$$\vec{m}_d \equiv N_d i_d S_d \vec{a}_d = k_d i_d \vec{a}_d \quad (2)$$

Onde k_d é uma constante que depende das dimensões do ímã e a corrente magnetizante i_d é considerada variável devido às características de operação do material na região de desmagnetização.

4.2. Densidade de fluxo magnético do estator

A densidade de fluxo magnético resultante do estator (\vec{B}) será dada pelo somatório vetorial das densidades de fluxo de cada bobina.

$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_y + \vec{B}_z \quad (3)$$

Onde \vec{B}_x , \vec{B}_y e \vec{B}_z são os vetores densidade de fluxo magnético das bobinas “a”, “b” e “c”, respectivamente, no sistema de coordenadas xyz .

5. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO ACIONAMENTO

No intuito de auxiliar na definição das coordenadas de posicionamento do rotor, o sistema cartesiano xyz é rotacionado no espaço, originando um novo sistema de coordenadas cartesianas $x'y'z'$. A Figura (7) mostra o eixo (d) de saída do motor paralelo ao eixo z' e normal ao plano ABC ; bem como, os respectivos versores \vec{i} , \vec{j} e \vec{k} paralelos aos eixos de coordenadas x' , y' e z' , respectivamente. A rotação 3D no espaço, em torno de um eixo qualquer da esfera pode ser representada por matrizes de transformação de coordenadas e álgebra de quatérnios (GALO; TOZZI, 2001).

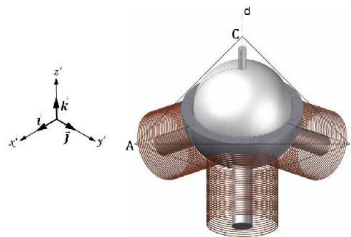


Figura 7. Modelo 3D rotacionado no sistema cartesiano $x'y'z'$

O esquema da Fig. (8) mostra, em termos de vetores unitários, o instante inicial de acionamento do motor, quando da operação de descolamento do eixo a partir da posição de equilíbrio 1 até a posição de equilíbrio 2. O vetor unitário \vec{a} estabelece a posição final da trajetória, sendo calculado a partir da entrada do operador com o par de ângulos em coordenadas esféricas correspondente às coordenadas da posição desejada.

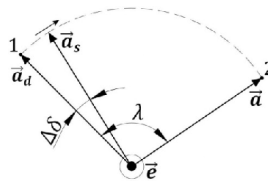


Figura 8. Trajetória angular da posição 1 para a posição 2

Idealmente, o vetor unitário \vec{a}_d , função instantânea dos ângulos de posição do rotor (θ_d, φ_d), percorre toda a trajetória de ângulo λ sendo arrastado pelo vetor unitário de campo do estator (\vec{a}_s). Nesse processo, o ângulo $\Delta\delta$, referido como *ângulo de comutação*, define pequenos incrementos sequenciais na posição do campo resultante do estator, assumidos à medida que as correntes nas bobinas são discretamente comutadas. E, contudo, vale ressaltar ainda que o intervalo de tempo entre o cálculo da próxima posição espacial a ser assumida pelo campo e a injeção das correntes relativas a essa posição, determinarão o perfil de velocidade angular durante a operação, considerando $\lambda \gg \Delta\delta$.

6. CONCLUSÕES

As peculiaridades da geometria do motor esférico evidenciam a proposta de montagem a partir de uma concepção teórica inicial. Vale ressaltar que somente as partes ativas do atuador foram apresentadas neste trabalho e, contudo,

características como robustez e eficiência serão dependentes de um sistema mecânico de sustentação do rotor em relação ao estator adequadamente projetado.

A modelagem matemática do motor foi estruturada a partir de conceitos elementares de análise vetorial e álgebra linear. Sendo que, na conjuntura do princípio de funcionamento, torna-se possível explicitar de forma satisfatória as relações entre as grandezas físicas envolvidas no acionamento elétrico, principalmente as estimativas referentes ao torque eletromagnético e à densidade de fluxo magnético do estator. Bem como, efetuar rotações no espaço cartesiano por intermédio de matrizes de rotação e quatérnios.

A estratégia de controle do acionamento foi direcionada no sentido de atender aos requisitos básicos de operação, a saber: precisão de posicionamento do eixo do rotor e preservação da integridade física dos elementos constituintes da máquina. No entanto, sua confiabilidade operativa torna-se função de uma série de fatores de ordem prática a serem executados, bem como adequada especificação de materiais, elementos de máquinas, sensores, controladores, interface homem-máquina e realização de testes experimentais que corroborem a viabilidade tecnológica do desenvolvimento.

7. REFERÊNCIAS

- Botelho, I.J., 2008, “Modelagem e Controle Linear de um Sistema de Levitação de Imã Permanente”, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle, São Paulo, Brasil.
- Galo, M., Tozzi, C.L., 2001, “A Representação de Matrizes de Rotação e o Uso de Quatérnios em Ciências Geodésicas”, In: Mitishita, Edson (Ed.), Série em Ciências Geodésicas, Vol. I, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Hayt, W.H., Buck, J.A., 2003, “Eletromagnetismo”, Mc Graw Hill, 6. Ed., Rio de Janeiro: LTC, Brasil.
- Juliani, A.D.P., 2007, “Análise do Campo Magnético de um Motor de Imã Permanente no Rotor Utilizando o Método dos Elementos Finitos”, 115 f., Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Kenjo, T., Sugawara, A., 1995, “Stepping Motors and Their Microprocessor Controls”, 2nd ed., Oxford Science Publications, Oxford, U.K..
- Mendes, R.M., Martins Neto, L., 1996, “Motor Esférico: Um tipo de posicionador” Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

8. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia e a todos aqueles que acreditam que a sinergia entre diferentes áreas do conhecimento é a força motriz de grandes inovações tecnológicas.

9. ABSTRACT

This paper presents a proposal of developing an electromagnetic actuator designed from a spherical rotor with three degrees of freedom. The main purpose is to evaluate the constructive and operational feasibility of a mechanism able to perform accurate angular positioning. The device includes two parts: a moving part coupled to a high energy density permanent magnet, rotor; and a fixed part made up of three orthogonal stranded coils assembled on a ferromagnetic core, stator. The operating principle is based on the interaction between the magnetic field generated by the controlled currents in the electromagnets and the magnetic field provided from the permanent magnet fixed inside the movable part. Due to the independent drive coils features and some constructive peculiarities, we can predict several functional advantages of this device over other commonly used electromagnetic actuators, such as servos and stepper motors. For example, reduced size and number of machine elements, constructive simplicity and robustness, possible absence of gears, high efficiency, extended lifetime, low moment of inertia and operational reliability. In order to accomplish this achievement and validate the actuator design proposal, it became necessary the studies on constructive geometry, 3D computer modeling, mathematical modeling and control strategy. This concept of electromagnetic actuator will be referred as ‘spherical motor’ throughout this work. Under the biorobotic context, it is pointed out the possibility of implementation in biomechanical systems, satisfactorily emulating structures, such as vision, wrist, shoulder, neck and hip joints.

Keywords: electromagnetic actuator, spherical motor, biomechanical joint, permanent magnet, modeling

10. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.