

## 14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

### DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE ATUADOR ESFÉRICO DE REAÇÃO PARA CONTROLE DE ATITUDE E ÓRBITA PARA SATÉLITES

ADRIANO C. S. PEREIRA<sup>1</sup>, ANDRÉ L. GONTIJO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, cesar.sousa@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Professor da Área de Indústria, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, algontijo@ifsp.edu.br.  
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.12.02.02-0 Estabilidade e Controle

**RESUMO:** O presente trabalho tem por objetivo realizar o dimensionamento estrutural de um projeto de atuador esférico de reação para controle de atitude e órbita para satélites, Este projeto faz parte de uma Iniciação Científica com bolsa PIBIFSP em andamento. O objetivo geral é conceber e projetar um atuador de baixo custo, robusto, preciso a fim de atender a demanda por projetos de satélite que requerem atuação de correção de orientação no espaço. Nesse contexto, se faz necessário realizar uma revisão bibliográfica sobre os tipos de atuadores existentes, modelo construtivo, vantagens e desvantagens, a fim de definir o modelo ideal para realizar melhorias e possíveis inovações. Diante do exposto, foi escolhido um atuador esférico que segue o modelo construtivo de um motor de indução trifásico, pois este possui vantagens em geração de torque, porém, ele é de difícil concepção em menor escala, fator necessário para nano satélites. O modelo foi projetado de forma que algumas partes possam ser impressas através de impressão 3DO rotor será construído através de conformação. Como resultados este trabalho apresenta as peças impressas e a montagem dos conjuntos mecânicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** esfera de reação; modelagem; impressão 3D; nano satélite.

#### STRUCTURAL DIMENSIONING OF REACTION SPHERE ACTUATOR FOR ATTITUDE AND ORBIT CONTROL FOR SATELLITES

**ABSTRACT:** This study has as objective realize the structural dimensioning of a spherical reaction actuator for attitude and orbit control for satellites. This work is a part of a Scientific Research with PIBIFSP scholarship in progress. The general objective is to concept and project a low-cost actuator, robust, accurate to attend to projects demand of satellites which require orientation adjust in space. In this context, it is necessary the accomplishment of a bibliographic review about the types of existing actuators, construction models, vantages, and disadvantages, to define the ideal model to develop improvements and possible innovations. Trough the described, was chosen a spherical actuator that follows a constructive model of a three-phase induction motor, because it has advantages on torque generation, but it has a difficult conception in low scale, required factor for nanosatellites. The model was designed so that some parts can be printed using 3D printing. The rotor will be built using forming. As a result, this work presents the printed parts and the assembly of the mechanical assemblies.

**KEYWORDS:** reaction sphere; modeling; 3D printing; nanosatellite.

#### INTRODUÇÃO

Sistemas de Controle de Atitude são utilizados para o ajuste da orientação de um satélite a partir de uma referência da orientação atual em comparação a um referencial fixo. Tal controle é realizado por intermédio de métodos matemáticos para estimação da orientação e, por fim, realizada atuação de correção de atitude (Silva, 2005).

Sistemas de controle de atitude para satélites geralmente utilizam dispositivos de torque de reação para ajustar sua atitude. Nesse contexto, pode-se citar o atuador de esfera de reação (AER), o qual tem por objetivo o movimento de uma esfera para produzir torques de reação e aplicá-los a um corpo fixo

(Craveiro; Sequeira, 2016). Nesse contexto, uma possível construção para uma AER vai ao encontro com os motores de indução trifásicos, sendo uma configuração possível o modelo na Figura 1.

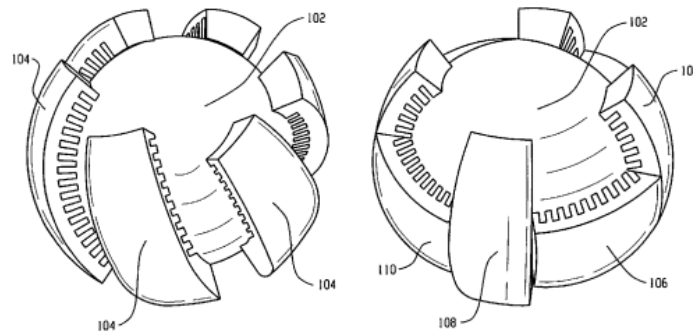


FIGURA 1. Modelo construtivo de uma AER.

Fonte: Ralph e Kumagai (2017).

No entorno da esfera encontra-se o estator com ranhuras (espaços livres para os fios da bobina), sendo estas variáveis de acordo com o número de espiras e/ou fases do indutor. A inclinação na ilustração à esquerda faz com que seja dispensável o uso do estator radialmente perpendicular aos estatores que estão situados na vertical (vide o conjunto à direita). Ainda, a esfera pode ser de cobre ou alumínio, oca e polida.

Diante do exposto, o dimensionamento do estator deve seguir critérios de redução de perdas e baixa geração de harmônicas, a qual depende da qualidade e formato do estator. São necessários materiais leves e que suportem altas temperaturas. A estrutura deve ser compacta, montagem simplificada e possuir robustez mecânica. O objetivo é produzir um atuador de baixo custo para projetos de nano satélites de padrão Cubesat, superior a 1U (cuboide de 10cm de lado).

## MATERIAL E MÉTODOS

Para o dimensionamento do atuador, se faz necessária uma revisão bibliográfica dos tipos de atuadores existentes para satélites, a fim de conhecer seus modelos construtivos, vantagens e desvantagens. A partir do exposto, foi feito o dimensionamento seguindo critérios construtivos de um motor elétrico trifásico, o qual teve sua modelagem estrutural realizada através do software Autodesk Inventor Professional. O conjunto do atuador inclui a modelagem do estator em lâminas de aço silício, rotor esférico em alumínio, fixação dos conjuntos estruturais, carcaça do atuador e montagem com a placa de circuito.

A etapa de manufatura do estator será feita por parceria com IFSP, Câmpus Itapetininga através de eletroerosão a fio. Os conjuntos mecânicos de fixação do estator e carcaça foram impressos por impressão 3D através de parceria com a UNESP, Câmpus São João da Boa Vista. Posteriormente, a fim de reduzir a propagação magnética, a carcaça do atuador poderá ser forjada em alumínio através do forno disponível no IFSP, Câmpus São João da Boa Vista.

O processo de fabricação da esfera será feito por conformação através de prensa no IFSP, Câmpus São João da Boa Vista. No entanto, o ferramental necessário será usinado por torno CNC disponível no IFSP, Câmpus Itapetininga. A ferramenta para usinagem será feita com tarugos de Aço Carbono para moldar chapa de alumínio. Para a concepção da esfera, se faz necessário o uso de chapa de alumínio 1100 na espessura de 1 mm para conformação de duas semiesferas, as quais serão unidas no entorno de uma esfera sólida em plástico PLA. Ainda, o interior da esfera de alumínio receberá uma camada de Ferrite em pó (ou ferromagnético) com grãos de 180 $\mu$ m.

As bobinas do atuador serão de fio de cobre 34 AWG, devido às suas especificações atenderem à necessidade do projeto. O número de espiras, serão calculados e simulados, antes da etapa de bobinagem. Os fios são esmaltados com verniz para isolamento entre as espiras da bobina e isolados no interior da ranhura através de fita de filme de poliéster, a qual foi projetada pelo fabricante para suportar as condições de aquecimento e condutividade das bobinas.

Para enrolar-as bobinas do atuador, será utilizado uma bobinadeira própria que foi desenvolvida para o projeto de pesquisa proposto devido a sua ausência de padronização com a indústria. A estrutura

da bobinadeira foi modelada e será impressa em PLA. A bobinadeira é composta por motor DC controlado por PWM através de uma placa de desenvolvimento ESP32 que envia sinal para um transistor BC337, responsável por acionar o motor. As rotações do eixo da bobina são contadas por uma chave fim de curso, a fim de contar o número de espiras da bobina. A ferramenta acoplada ao eixo do motor contempla três dimensões diferentes para as bobinas do motor.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seção a seguir apresentará os resultados obtidos a partir da modelagem estrutural realizada, de acordo com os critérios já apresentados anteriormente. Nesse contexto, a Figura 2 representa a concepção da esfera em alumínio, ou rotor.

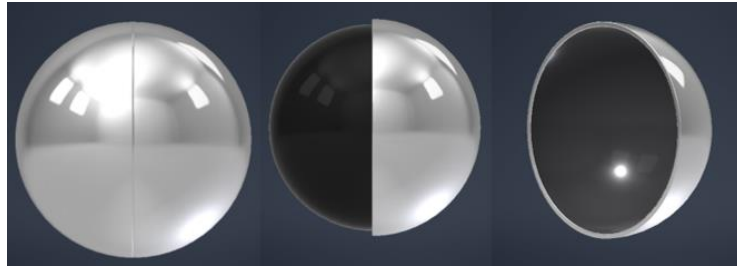


FIGURA 2. Conjunto mecânico do rotor com semiesferas de alumínio, esfera interna sólida em polímero PLA e revestimento interno de Ferrite em pó.

São observados no rotor uma simples montagem, na qual considera-se a homogeneidade da superfície, a fim de contribuir com o fluxo magnético induzido, mas também para ser leve. A espessura das semiesferas em alumínio é de 1,0mm e seu diâmetro externo de 54,3mm. A esfera interna tem como propósito acomodar as semiesferas e conceder resistência mecânica.

Em sequência, na Figura 3, observa-se o modelo de fixação do bloco de estator e suas bobinas.

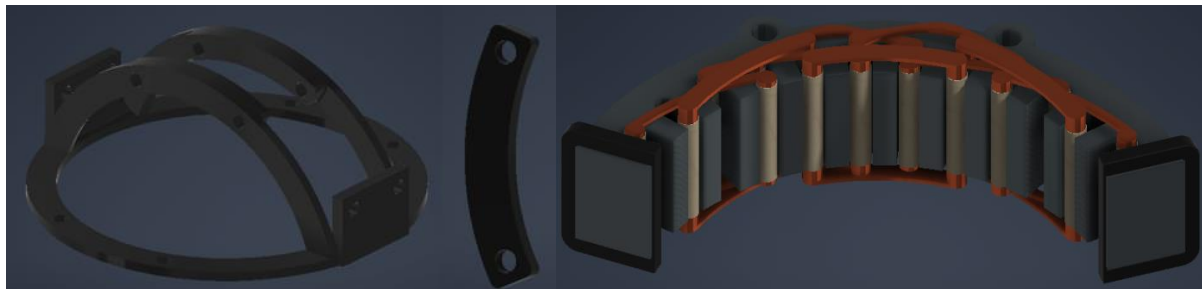


FIGURA 3. Conjunto estrutural de fixação do estator, flange da fixação e conjunto estrutural de bloco de estator com fixação nas extremidades, bobinas ilustrativas e isolante entre ranhuras.

O modelo de fixação do estator foi feito considerando as dimensões do bloco de estator com empilhamento de placas de aço-silício e desvio entre fixação para posterior acomodação das bobinas externas à ranhura. A base da fixação foi feita sem o espaçamento descrito anteriormente para evitar a geração de suportes na impressão 3D, o que torna frágil a região e com necessidade de retrabalho no acabamento. O bloco do estator possui 45 placas de aço silício de 0,3mm de espessura. Nas extremidades há a presença de uma fixação para preservar a união das placas.

Ainda, para melhor descrever o dimensionamento do estator, são observados na Figura 4 a acomodação das bobinas, ligação dos fios e fases do motor.

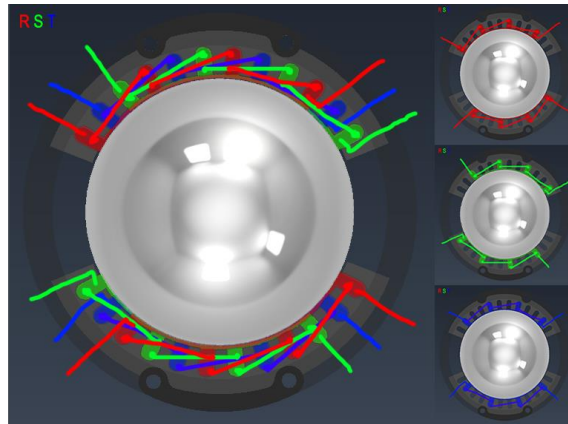


FIGURA 4. Esquemático de ligações das bobinas, representando cada fase por R, S e T. À direita pode ser visto cada fase individualmente.

A ligação de uma mesma fase é feita entre três conjuntos de bobinas em série, as quais são acomodadas nas ranhuras. A montagem do rotor e estator permitiu a simetria no paralelismo entre os blocos de estator, o que garante uma melhor continuidade do fluxo magnético induzido.

O conjunto do rotor, bloco de estator e fixações podem ser vistos na Figura 5.

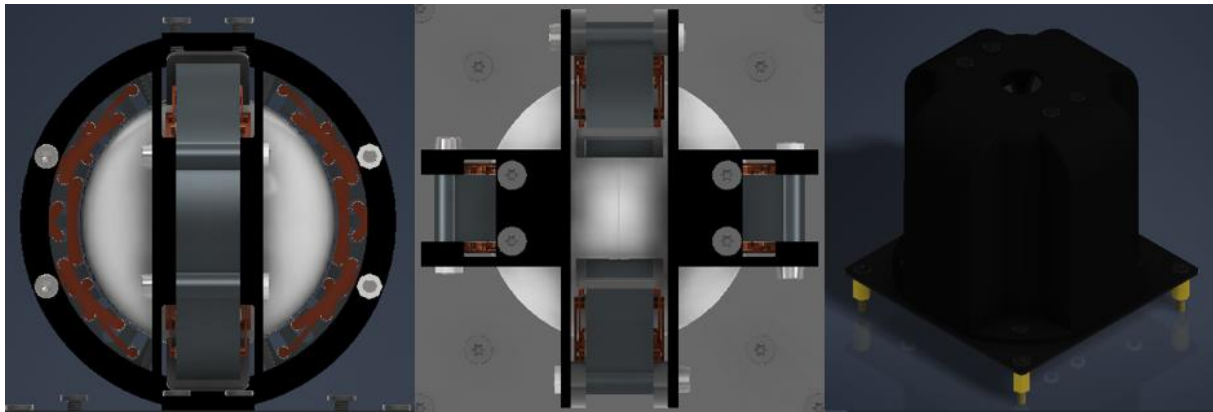


FIGURA 5. Montagem mecânica dos conjuntos de rotor, bloco de estator e suas bobinas, fixação dos parafusos, carcaça do motor e representação da placa de circuito.

Diante da montagem estrutural final, são observados os parafusos de fixação utilizados, os quais vão ao encontro com a necessidade em preservar a qualidade do soquete durante a montagem do protótipo, evitando desgaste ou folga. Em sequência, na Figura 6, observa-se a montagem final após impressão dos conjuntos estruturais, exceto o rotor.

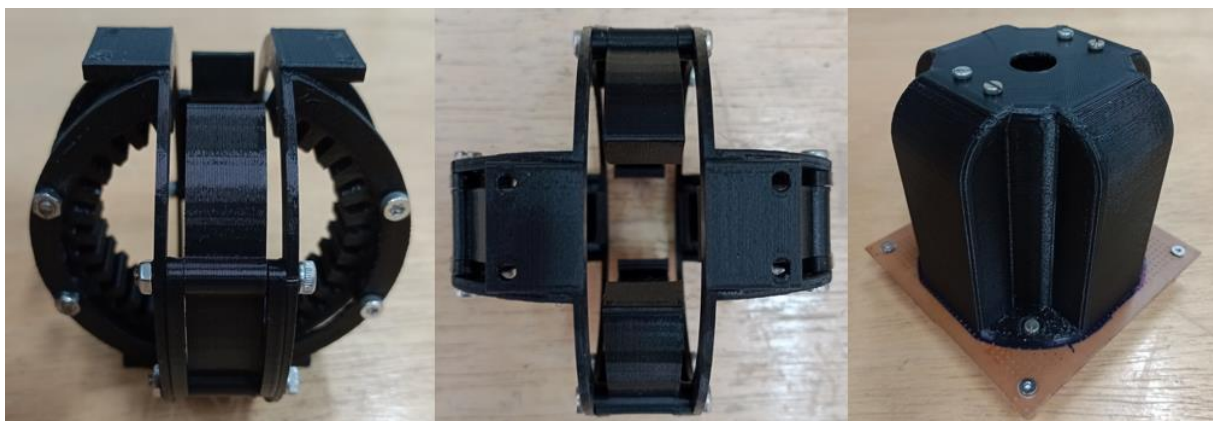


FIGURA 6. Montagem estrutural final com fixação dos blocos de estator, modelo representativo de bloco do estator, fixações dos parafusos e placa de circuito ilhada.

São observados no modelo impresso a conformidade com os parâmetros estabelecidos e resultados esperados. O conjunto apresenta união precisa entre as peças avulsas, rigidez e simples montagem e com dimensões de 85,0x85,0x81,7mm.

No entanto, os parafusos em aço utilizados na fixação entre carcaça do motor e placa de circuito, possuem desvios com a ferramenta, devido à falta de adequação às normas pelo fabricante. Foi utilizado parafuso em fenda para fixação provisória da estrutura.

## CONCLUSÕES

Diante do trabalho apresentado, foi possível atender aos critérios estabelecidos para dimensionamento do atuador, os quais possuem baixo desvio entre o modelo 3D e impresso. A estrutura não apresenta alta flexibilidade após fixação dos conjuntos estruturais, o que garante robustez, a qual se faz necessária durante as forças de momento produzidas no funcionamento do atuador. Ainda, as dimensões do atuador permitem a acomodação em nano satélites de padrão Cubesat 1U.

Será necessária a substituição dos parafusos de fixação da carcaça do atuador para atender aos demais critérios de dimensionamento. Ainda, a usinagem do rotor está em processo de compra de materiais. O enrolamento das bobinas será realizado após finalizada a manufatura da bobinadeira por impressão 3D e sua programação. As próximas metas do protótipo serão realizadas a fim de estudar e projetar o circuito de acionamento, análise do fluxo magnético e torque produzidos, a fim de ser realizado o redimensionamento das bobinas, preservando a estrutura apresentada neste estudo, até que sejam obtidos resultados satisfatórios.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

A.C.S.P realizou a pesquisa, concepção, modelagem, manufatura e montagem do protótipo. A.L.G realizou a orientação sobre os conceitos fundamentais para pesquisa, concepção e manufatura.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho só seria possível graças a oportunidade dada a mim pelo orientador em realizar este projeto de pesquisa proposto e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica. Além do exposto, eu gostaria de agradecer aos docentes que auxiliaram com sugestões valiosas.

## REFERÊNCIAS

RALPH, L. H., Jr; KUMAGAI, M. **Spherical Induction Motor**. Depositante: Carnegie Mellon University. Titular: Carnegie Mellon University. US 9,853,528 B2. Depósito: 10 jun. 2014. Concessão: 26 dez. 2017. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9853528B2/en?q=US9853528>. Acesso em: 31 ago. 2023.

SILVA, C M. L. **Estimação conjunta de órbita e atitude de satélites artificiais estabilizados por rotação utilizando observações do Magnetômetro e Sensor Solar**. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.15.17.32/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2023.

CRAVEIRO, A. A.; SEQUEIRA, J. S. **Reaction Sphere Actuator**. Lisboa, Portugal: IFAC, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316315099>. Acesso em: 31 ago. 2023.