

Desenvolvimento de Torqueador Magnético para Controle de Atitude de CUBESAT Baseado na Teoria de Projeto Axiomático

Matheus A. Soares*, Luiz S. Martins-Filho*, Eduardo Gueron*, Eduardo S. Ferreira*, Hérlon O. Morsch**

*Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Av. dos Estados, 5001 - Bangú, 09210-580 Santo André - SP, Brasil (m.almeida.aero@outlook.com, luiz.martins@ufabc.edu.br, eduardo.gueron@ufabc.edu.br, eduardosantos.ferreira@ufabc.edu.br)

**MAGMATTEC Tecnologia em Materiais Magnéticos Ltda, Av. Clemente Cifali, 225 - Distrito Industrial Ritter, 94935-225 Cachoerinha - RS, Brasil (herlon@magmattec.com)

Abstract: The article deals with the development of a magnetic torquer based on the axiomatic design theory to define the constructive characteristics of the device to be applied in the attitude control of small-size satellites. The physical principles of this actuator, the modeling of the characteristics to be manipulated by the theory, the proposal of a prototype and the initial experimental tests for the design strategy validation are presented. For the core of the coil that constitutes a torquer rod, an innovative material with nanocrystalline composition was chosen, the FINEMET®, aiming to take advantage of its magnetic permeability properties and reduced hysteresis phenomenon to generate a more linear signal, a requirement of the control system. Preliminary results show that the project proposal is promising as a contribution to the improvement of fundamental devices for the continuous and accelerated growth of the use of Cubesats.

Resumo: O artigo trata do desenvolvimento de um torqueador magnético baseado na teoria do projeto axiomático para definir as características construtivas do dispositivo a ser aplicado no controle de atitude de satélites de pequeno porte. São apresentados os princípios físicos do atuador, a modelagem das características a serem manipuladas pela teoria, a proposta de um protótipo e os testes experimentais iniciais para a validação da estratégia de projeto. Para o núcleo da bobina que constitui um torqueador, foi escolhido um material inovador e de composição nanocristalina, o FINEMET®, visando aproveitar suas propriedades de permeabilidade magnética e reduzido fenômeno de histerese para geração de sinal mais linear, um requisito do sistema de controle. Os resultados preliminares mostram que a proposta de projeto é promissora enquanto contribuição para a melhoria dos dispositivos fundamentais para o contínuo e acelerado crescimento do uso de Cubesats.

Keywords: Artificial satellites; Cubesat; Attitude control; Magnetic torquer rod; Axiomatic design theory; Nanocrystalline material.

Palavras-chaves: Satélites artificiais; Cubesat; Controle de atitude; Torqueador magnético; Teoria do projeto axiomático; Material nanocristalino.

1. INTRODUÇÃO

Na área da engenharia aeroespacial, a busca por redução de massa e dimensões de sistemas de controle, incluindo computadores de bordo, sensores, atuadores e cargas úteis, ganhou particular importância com o rápido desenvolvimento de veículos voadores e satélites de pequeno porte, tais como drones e Cubesats. Esses veículos se tornaram sofisticados e capazes de realizar missões complexas e de baixo custo, democratizando o acesso ao uso do espaço atmosférico e das órbitas de baixa altitude em torno do planeta.

As missões dos pequenos satélites geralmente requerem um apontamento espacial preciso e estável, denominado atitude. Esse requisito está associado ao desempenho adequado do sistema controle de atitude (ADCS), seus sensores, atuadores

e processadores (Markley & Crassidis, 2014). O atuador mais utilizado nesse controle é o torqueador magnético, um solenoide, com ou sem núcleo, que interage com o campo geomagnético gerando torques no satélite (Fig. 1).

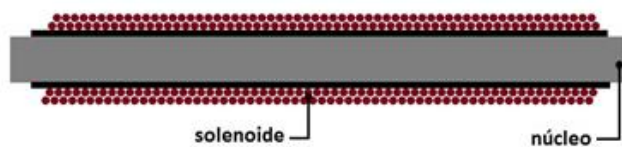


Fig. 1: Esquema de um dispositivo torqueador magnético com núcleo.

O estudo de projeto desses atuadores para o controle de atitude remonta aos primórdios da exploração espacial, como mostra um relatório do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) sobre torqueadores magnéticos, datado de 1965 (Lincoln Lab,

1965). Um outro estudo, desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Carrara & Varotto, 1995), propõe um roteiro detalhado para o projeto de torquadores, para configurações com e sem núcleo. O problema de concepção, fabricação e testagem de um atuador com capacidade magnética elevada é abordado por Lee *et al.* (2005). Um outro trabalho está focado num algoritmo baseado em modelagem matemática para o projeto de torquador com núcleo de liga CK30 (Mehrijardi & Mirshams, 2010). Já Farrahi & Sanz-Andrés (2013) apresentam um método para avaliar a eficiência de amortecimento de diferentes materiais de núcleo e formas para atuadores em pequenos satélites.

O objetivo deste trabalho é obter um projeto otimizado em relação a algumas características fundamentais de torquadores magnéticos para Cubesats (e.g., dimensões, momento de dipolo magnético e linearidade de acionamento). Para esse fim, adota-se uma metodologia baseada na teoria do design axiomático.

Na Seção 2, os fundamentos de eletromagnetismo do funcionamento do dispositivo torquador são apresentados. A metodologia baseada na teoria do design axiomático é introduzida na Seção 3. O projeto do torquador é apresentado na Seção 4. Na seção 5, são discutidos e analisados resultados experimentais de testes. A Seção 6 conclui o artigo.

2. FUNDAMENTOS DE ELETROMAGNETISMO DOS TORQUEADORES

O princípio de atuação para o controle de atitude de um torquador magnético é a interação entre o dispositivo e o campo geomagnético. O torquador produz um torque no corpo do satélite em torno de seu centro de gravidade, dado por:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

onde \mathbf{m} é o momento de dipolo magnético (em Am²) e \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético ou indução magnética (em T ou N/Am) (Feynmann, 2019; Markley & Crassidis, 2014; Gerhardt & Palo, 2010).

Considerando-se um campo geomagnético constante (num ponto da órbita do satélite), a magnitude do torque resultante depende diretamente da direção e da magnitude do momento de dipolo gerado no atuador. Esse momento depende do solenoide (número de espiras, material e bitola do enrolamento) e do material e das dimensões do núcleo (caso não seja um solenoide sem núcleo). O material do núcleo é escolhido em função de suas propriedades magnéticas quando exposta a um campo.

Tomando os efeitos eletromagnéticos no torquador a seguinte equação descreve tais fenômenos:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ é a permeabilidade magnética do vácuo, $\mathbf{H} = n\mathbf{I}/l_{sol}$ é o campo magnético gerado pelo solenoide (n é a quantidade de espiras, \mathbf{I} , a corrente elétrica e l_{sol} o comprimento do solenoide) e $\mathbf{M} = \mathbf{m}/V_{nuc}$ é a magnetização do núcleo com \mathbf{m} representando o momento de dipolo magnético e $V_{nuc} = l^2 l_{nuc}$ o valor do volume do núcleo (l é o lado do vértice quadrado e l_{nuc} o comprimento do núcleo).

Para aferir o valor do momento de dipolo gerado pelo torquador a utilização de um magnetômetro é necessária. Há a aferição do fluxo magnético na ponta do aparelho em três direções perpendiculares. Para efeitos de simplicidade, foi utilizada somente a componente axial. Duas orientações em relação à direção axial do torquador foram aferidas: a 0° e 90°. Chamaremos essas direções de radial e transversal, respectivamente.

Para descobrir o valor momento de dipolo pela aferição do fluxo magnético, Lee *et al.* (2002) concedem equações para conversão desses valores na forma:

- Para 0°,

$$m_1 = \frac{4\pi l_{nuc}}{\mu_0} \left(\frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \right) B_{1,l} \quad (3)$$

onde, m_1 é o momento de dipolo radial, $B_{1,l}$ é o fluxo magnético radial medido e a e b são definidos como

$$\begin{aligned} a &= R_1 - l_{sol}/2 \\ b &= R_1 + l_{sol}/2 \end{aligned} \quad (4)$$

onde R_1 é a distância radial entre o centro do torquador.

- Para 90°,

$$m_2 = \frac{4\pi}{\mu_0} (R_2^2 + l_{nuc}^2/4)^{3/2} B_{2,l} \quad (5)$$

onde m_2 é o momento de dipolo transversal, R_2 é a distância transversal do centro do torquador para o magnetômetro e $B_{2,l}$ é o fluxo magnético transversal medido.

Por outro lado, podemos efetuar a translação do fluxo magnético medido pelo magnetômetro (ao longe) para o centro do solenoide (central). Tal cálculo foi realizado por Santoni e Zelli (2009) e pode ser expresso na direção radial como:

$$B_{1,c} = \frac{1}{A_1} \left(\frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \right) B_{1,l} \quad (6)$$

onde $B_{1,c}$ é o fluxo radial no centro do solenoide e $A_1 = l^2/4\pi$ é um elemento de correção de área que é encontrado substituindo (6) em (3) e igualando com $m_1 = B_{1,c} V_{nuc} / \mu_0$. Por semelhança, na direção transversal temos o equivalente:

$$B_{2,c} = \frac{1}{A_2} \left(\frac{p^2 q^2}{q^2 - p^2} \right) B_{2,l} \quad (7)$$

onde $B_{2,c}$ é o fluxo transversal no centro do solenoide, p e q são definidos como

$$\begin{aligned} p &= R_2 - l/2 \\ q &= R_2 + l/2 \end{aligned} \quad (8)$$

De modo que R_2 é a distância transversal do centro do solenoide ao magnetômetro. Nesse caso a área de correção é dada por

$$A_2 = \frac{l_{nuc} l^2}{4\pi(R_2^2 + l_{nuc}^2/4)^{3/2}} \left(\frac{p^2 q^2}{q^2 - p^2} \right) \quad (9)$$

A partir de (6) e (7), temos o lado esquerdo de (2) e podemos comparar com o lado direito calculando o campo magnético gerado pelo solenoide as respectivas momentos de dipolo por (3) e (5). A diferença entre esses dois modos pode ser expressa pela fórmula de erro:

$$\varepsilon = |B_{esq} - B_{dir}| / B_{esq} \quad (10)$$

onde B_{esq} representa cada fluxo magnético encontrado pelo lado esquerdo, enquanto B_{dir} representa o valor encontrado pelo lado direito.

Considerando um núcleo de material ferromagnético, as propriedades magnéticas são intensificadas e o momento de dipolo magnético é aumentado. No entanto, outro fenômeno é produzido, um ciclo de histerese magnético gerado no núcleo. A relação entre a densidade do fluxo magnético e o campo magnético não é linear, e depende da evolução temporal da magnetização do material.

O diagrama da histerese é ilustrado na Fig. 2 (Ousalo, 2013). Esta curva $B - H$ para um material é geralmente caracterizada por três parâmetros: a densidade máxima B_s ou saturação, a densidade de fluxo remanescente B_r ou reminiscência, e o campo magnético necessário para anular a magnetização (campo coercivo ou coercividade) H_c .

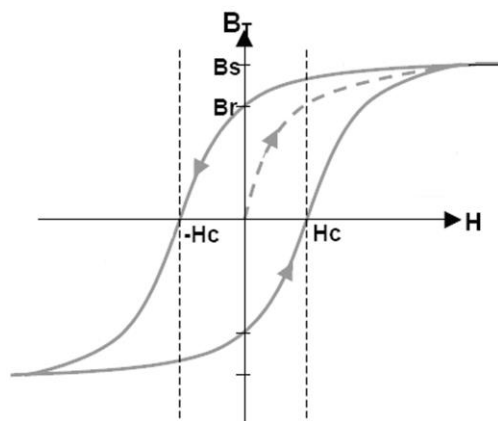


Fig. 2: O diagrama da histerese (Ousalo, 2013).

3. TEORIA DO PROJETO AXIOMÁTICO

Projeto axiomático é um método científico desenvolvido para tomar decisões adequadas para um produto, sistema, processo ou serviço que está em fase de projeto (Suh, 1990). Para um subproduto, o objetivo deste método é fornecer o melhor modelo para gerar um produto de qualidade, ou seja, um produto que satisfaça suas especificações de projeto propostas pelos clientes (Suh, 1995; Roohnavazfar, 2014). O design axiomático especifica quatro domínios:

- Domínio do cliente (CA): requisitos do cliente e especificações do produto;
- Domínio funcional (FR): requisitos funcionais do produto conforme especificado pelos clientes;
- Domínio físico (DP): formulação física para atingir os requisitos funcionais;
- Domínio do processo (PV): métodos de fabricação para controlar o domínio físico;

Para garantir a melhor solução Suh (1995) propôs dois axiomas:

- Axioma da Independência: FR são independentes e os processos do projeto precisam manter sua independência.
- Axioma da Informação: Se houver mais de um projeto que satisfaça o Axioma I, o melhor projeto é o mais simples, aquele que possui menos informação.

O projeto é uma tarefa de decomposição ziguezagueando entre os domínios FR e DP: quando um FR é definido, primeiro é necessário definir uma série de DP que objetivam este FR e depois é permitido definir outro FR. Os requisitos funcionais são definidos como um vetor FR e o domínio físico como DP.

4. PROJETO DO DISPOSITIVO TORQUEADOR

O projeto da haste de torque magnético está dividido em duas etapas: a seleção do material do núcleo e o projeto da bobina usando a teoria do projeto axiomático.

4.1. Núcleo do torqueador magnético

O material do núcleo escolhido para o núcleo é a liga magnética FINEMET® (Hitachi, 2016), material nanocristalino composto pelos metais Fe, Cu e Nb e ainda por B e Si, uma combinação que provê permeabilidade e saturação de densidade de fluxo magnético melhores que outras ligas metálicas, com perspectiva de melhoria de desempenho. A densidade desse material é de $7,3 \text{ g/m}^3$.

Pesquisas sobre materiais magnéticos para diversas aplicações, após décadas de predominância de ligas de aço com presença de silício, recentemente se voltaram para ligas magnéticas nanocristalinas (Gheiratmand & Hosseini, 2016). Em particular, o FINEMET® tem despertado grande interesse e tem sido foco de vários estudos devido às suas propriedades

magnéticas e características, e.g. alta saturação magnética, alta permeabilidade, baixa perda de núcleo (Fig. 3).

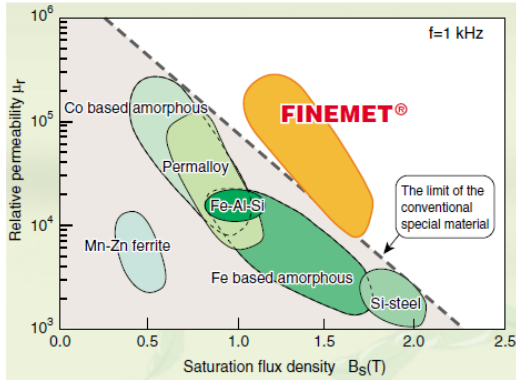


Fig. 3: Permeabilidade relativa e densidade de saturação de fluxo magnético de vários materiais magnéticos (Hitachi, 2016).

4.2. Projeto axiomático do torqueador

O primeiro passo do projeto de um produto é formalizar as demandas da aplicação desse produto, e estabelecer os requisitos funcionais mínimos que expressam o domínio do demandante. Em termos de alimentação, a tensão máxima disponível é de 5 V. Espera-se que o torqueador gere em torno de $0,2 \text{ A.m}^2$. O material do núcleo é FINEMET® na forma de barra retangular ($8 \times 8 \times 100 \text{ mm}$), com permeabilidade magnética relativa de 50. O número de camadas de enrolamento deve estar entre 1 e 15, para minimizar a massa. O fio de cobre do enrolamento deve estar entre as bitolas AWG 25 e 33, em função do processo de enrolamento. Entre o núcleo e o solenoide há uma carcaça produzida com espessura de 5mm, de forma que o solenoide começa com espessura de 13,5 mm. O domínio do demandante é expresso em termos de requisitos funcionais (FR):

- FR_1 = diâmetro do fio (d_{fio}), entre 0,180 e 0,455 mm;
- FR_2 = momento de dipolo magnético (m), cerca de $0,2 \text{ Am}^2$;
- FR_3 = a tensão (U), 5 V;

O primeiro requisito funcional específica o parâmetro número de espiras, n , através da equação:

$$n = kn_{cam} = l_{sol} n_{cam} \frac{1}{d_{fio}} \quad (11)$$

onde n_{cam} é o número ideal de camadas. A constante $k = l_{sol}/d_{fio}$ representa a quantidade de espiras que é possível de se encaixar em uma camada dados o comprimento do solenoide e diâmetro do fio.

O segundo requisito dita a corrente que é necessária aplicar no solenoide para que o torqueador gere o momento de dipolo especificado. Tomando que o fluxo magnético sentido é proporcional ao campo magnético através da permeabilidade relativa do sistema, μ_r , então temos:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (12)$$

Igualando à (2), temos a relação entre corrente e momento de dipolo:

$$I = \frac{l_{sol}}{(\mu_r - 1)nV_{nuc}} m \quad (13)$$

O último requisito dita o valor da resistência máxima que o torqueador pode ter dada a corrente encontrada por (13) via lei de Ohm:

$$R_{max} = \frac{U}{I} \quad (14)$$

O comprimento do fio necessário para enrolamento depende da largura interna do solenoide e do diâmetro do fio da seguinte forma. Para enrolar a primeira camada de fio o fio necessário precisa de um comprimento expresso da seguinte forma:

$$l_{fio_1} = 4kl_{int} \quad (15)$$

Cujo valor é equivalente ao perímetro da seção transversal do solenoide vezes a quantidade de espiras cabíveis em uma camada. Como a segunda camada é posta sobre a primeira, então o comprimento de fio é:

$$l_{fio_2} = 4k(l_{int} + d_{fio}) \quad (16)$$

Fazendo isso para as n_{cam} camadas, teremos um comprimento de fio final de:

$$l_{fio} = 4k[l_{int}n_{cam} + (n_{cam} - 1)d_{fio}] \quad (17)$$

Pelo fato da dependência com o diâmetro do fio, o comprimento do fio não pode ser um parâmetro de projeto, mesmo que o seu requisito funcional seja o comprimento interno do fio. Mas o seu cálculo pode ser uma variável de controle. Com base no comprimento do fio podemos encontrar a resistência do fio através da relação:

$$R_{fio} = \frac{4\rho l_{fio}}{\pi d_{fio}^2} \quad (18)$$

Onde $\rho = 1,724 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$ é a resistividade do cobre. A resistência máxima calculada na equação (14) deve ser maior que a resistência dada na equação (18).

Para o cálculo dos parâmetros de projeto são considerados constantes os seguintes valores:

- Número de camadas: $n_{cam} =$ entre 1 e 15;
- Comprimento do núcleo: $l_{nuc} = 100 \text{ mm}$;
- Largura do núcleo: $l = 8 \text{ mm}$;

- Permeabilidade magnética relativa: $\mu_r = 50$;
- Comprimento do solenoide: $l_{sol} = 90$ mm;
- Largura interna do solenoide $l_{int} = 13,5$ mm.

A relação entre FR e DP é expressa por

$$\begin{bmatrix} d_{fio} \\ m \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ I \\ R \end{bmatrix} \quad (19)$$

As relações entre os parâmetros geram superfícies, como mostrado nas Fig. 4 a Fig. 8.

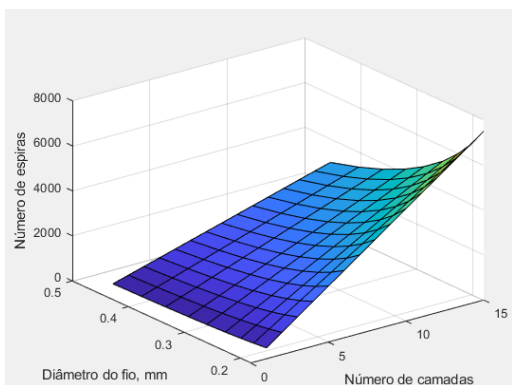


Fig. 4: Número de espiras como função do número de camadas e da bitola do fio de cobre.

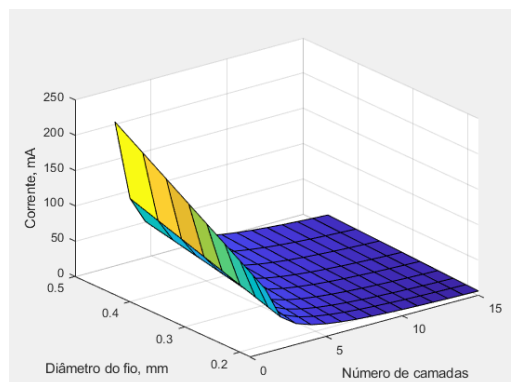


Fig. 5: Corrente enquanto função do número de camadas e diâmetro do fio.

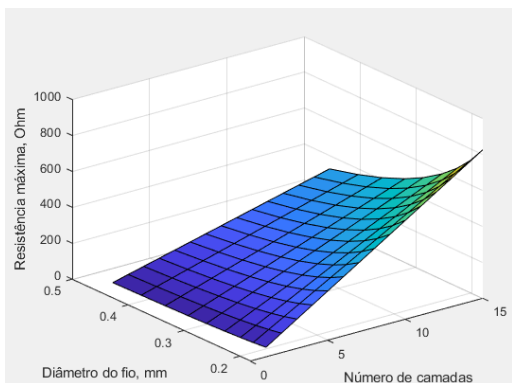


Fig. 6: Resistência máxima em função do número de camadas e diâmetro do fio.

Para resolver este problema usando a teoria axiomática, algumas restrições precisam ser corrigidas. No entanto, o campo magnético gerado pelo solenoide e a indução saturada são fixados como consequência deste modelo. O campo magnético é de 1005 A/m e a indução saturada é de 27,8 mT para qualquer valor de determinado DP.

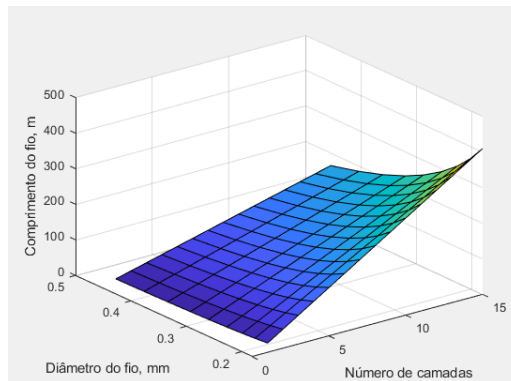


Fig. 7: Comprimento do fio em função do número de camadas e diâmetro do fio.

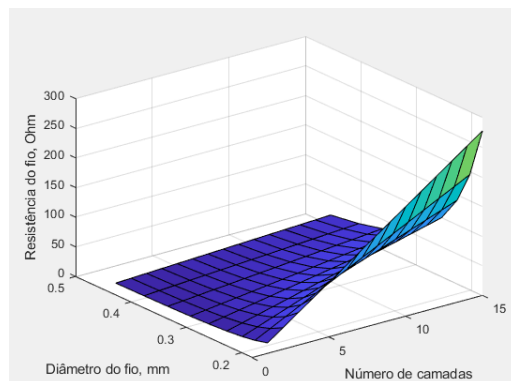


Fig. 8: Resistência do fio como função do número de camadas e diâmetro do fio, conforme equação (18).

A partir dessas figuras relacionando os parâmetros, foram realizadas escolhas combinadas e iterativas de valores para definir as características construtivas do primeiro protótipo do dispositivo, base para validação da modelagem matemática do projeto axiomático.

4.3. Protótipo fabricado

O primeiro protótipo foi definido com um enrolamento com fio AWG 30 e 1600 espiras. Esse torqueador foi fabricado para validar os procedimentos de projeto (vide Fig. 9). A fabricação não apresentou dificuldades especiais, apenas os cuidados na constituição do núcleo, uma barra formada por superposição de placas. O protótipo teve suas dimensões estabelecidas no projeto, tais como comprimento do solenoide, largura do núcleo, largura interna do solenoide, etc, e apresentou pequenas diferenças em razão das técnicas de fabricação, sobretudo no processo de enrolamento (detalhes na Tabela 1).

O solenoide do protótipo foi projetado com 5 camadas, todavia a uniformidade entre as espiras por camada (valor de k) não se mantém constante devido à ocupação de espaços entre um fio

e outro. A resistência do fio obtida via medição nos terminais do solenoide é de 33Ω . O comprimento do fio foi calculado conforme (18). Para o cálculo da corrente necessária projetada segue-se o cálculo conforme (13), todavia para aferir esse valor no protótipo fabricado foi necessário medir o fluxo magnético gerado pelo dispositivo. Os valores de resistência de projeto e fabricação foram calculados considerando uma tensão de 5V.

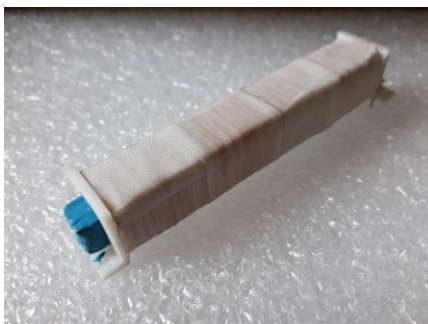


Fig. 9: Protótipo do dispositivo torqueador magnético produzido com núcleo de FINEMET®, fio AWG 30 e 1600 espiras.

Tabela 1: Valores dos parâmetros do protótipo projetado e obtidos na fabricação.

Parâmetro	Fabricado	Projetado
Número de espiras	1600	1770
Corrente para $0,2 \text{ Am}^2$, mA	27,7	25,7
Resistência para 5V, Ω	180	195
Resistência do fio, Ω	33	32,6
Comprimento do fio, m	97,5	96,7
Massa do protótipo, g	135,5	

5. TESTES E RESULTADOS

A configuração experimental dos testes é baseada no trabalho de Lee et al. (2002). As configurações radial e transversal usadas para as medições da densidade do fluxo magnético conforme a Fig. 10. O dispositivo sensor aplicado nessas medições é o SENSYS FGM3D/250 (Sensys, 2020), um sensor do tipo *fluxgate* de alta sensibilidade e precisão.

Para as disposições radial e transversal o magnetômetro esteve distante $R_1 = 109,5 \text{ mm}$ e $R_2 = 64,5 \text{ mm}$ do centro do protótipo, respectivamente. Foi disposta uma fonte de corrente alternada (AC) com frequência fixa de 60 Hz na extremidade do fio torqueador, enquanto a outra ponta foi aterrada. Em série com o torqueador foram dispostos dois resistores de 100Ω . Nos terminais de um destes resistores foi disposto o medidor de um osciloscópio para medir a corrente no torqueador. Tal canal mede a tensão entre os terminais e a corrente é encontrada utilizando a lei de Ohm para o respectivo resistor. Outro canal do osciloscópio foi utilizado para medir o sinal do magnetômetro que é dado em unidades de tensão elétrica. Os

testes foram realizados à temperatura ambiente no laboratório, que variou entre 23 e 24 °C.

A máxima tensão aplicada é aquela em que o torqueador atinge a saturação, que pode ser conferida como sendo o ponto onde o fluxo magnético não se altera mesmo com o aumento da corrente. Para esse protótipo na direção radial isso ocorre para uma corrente de 97,0 mA resultando num fluxo magnético sentido ao longe de $B_{1,s,l} = 146 \mu\text{T}$. No centro do torqueador esse valor sobe para $B_{1,s,c} = 1,16 \times 10^{-1} \text{ T}$. Na direção transversal por sua vez, obtemos $B_{2,s,l} = 24,0 \mu\text{T}$ e $B_{2,s,c} = 2,23 \times 10^{-2} \text{ T}$ ao longe e no centro do torqueador, respectivamente. Os momentos de dipolo magnético calculados na saturação são $m_{1,sat} = 0,736 \text{ Am}^2$ e $m_{2,sat} = 0,130 \text{ Am}^2$, respectivamente para a direção radial e transversal. Os campos coercivos são -211 e -106 A/m, para as direções radial e transversal respectivamente. As reminiscências são $B_{1,r,l} = 20,0 \mu\text{T}$ e $B_{1,r,c} = 1,56 \times 10^{-2} \text{ T}$, para a direção radial e $B_{2,r,l} = 3,00 \mu\text{T}$ e $B_{2,r,c} = 2,53 \times 10^{-3} \text{ T}$, para a direção transversal. Um resumo desses resultados pode ser visto na Tabela 2. Na direção radial campo magnético e a magnetização são significativamente maiores que na direção transversal, o que é uma constatação positiva pois indica que o núcleo está concentrando a eficiência do campo magnético.

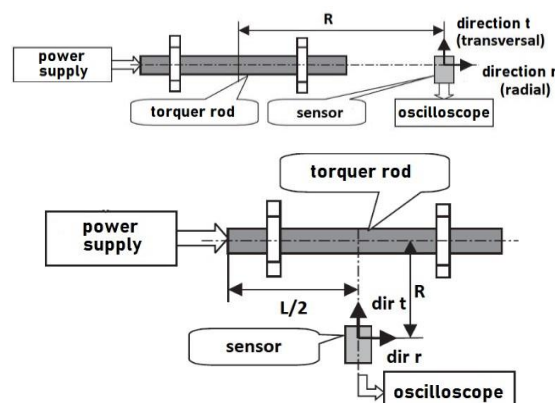


Fig. 10: Configurações radial e transversal para medição do campo magnético gerado pelos dispositivos torqueadores. (Adaptado de Lee et al., 2002).

Tabela 2: Sumário dos resultados dos testes.

Propriedade	Valor
R_1 , mm	109,5
R_2 , mm	64,5
$B_{1,s,l}$, μT	146
$B_{1,s,c}$, T	0,116
$B_{2,s,l}$, μT	24,0
$B_{2,s,c}$, T	0,0223
$B_{1,r,l}$, μT	20,0
$B_{1,r,c}$, μT	$1,56 \times 10^{-2}$
$B_{2,r,l}$, μT	3,00
$B_{2,r,c}$, μT	$2,53 \times 10^{-3}$
$m_{1,sat}$, Am^2	0,736
$m_{2,sat}$, Am^2	0,130

Mais detalhes sobre os resultados das medidas de campo magnético podem ser vistos nas Fig. 11 a Fig. 14: densidade de fluxo radial, momento de dipolo magnético na direção radial, a densidade de fluxo transversal, e o momento de dipolo transversal. Os valores são plotados em relação ao campo magnético do solenoide. Analisando o formato das curvas de campo, pode-se concluir que o fenômeno de histerese é pequeno, o que está de acordo com as características do material nanocristalino do núcleo.

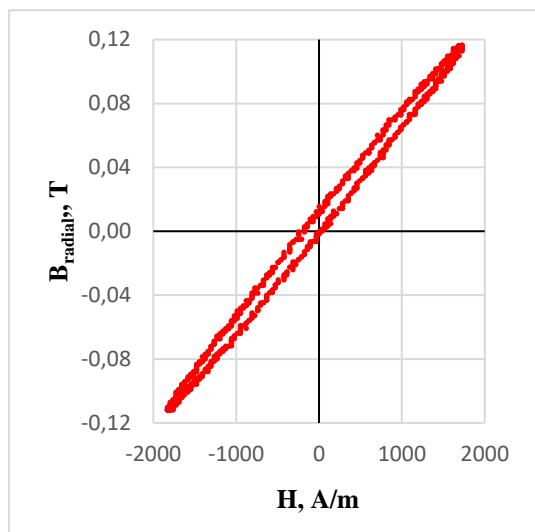


Fig. 11: Medidas de campo magnético para o protótipo T0100-1: densidade de fluxo magnético radial.

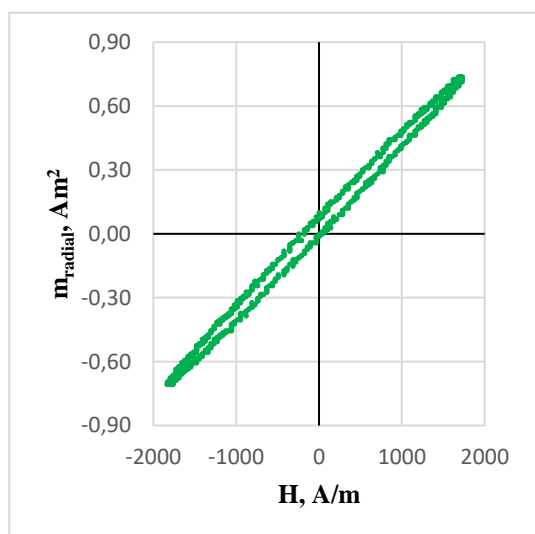


Fig. 12: Medidas de campo magnético para o protótipo T0100-1: momento de dipolo magnético radial.

Esses resultados preliminares apontam para um desempenho adequado do dispositivo projetado através da estratégia baseada na Teoria do Projeto Axiomático. A principal característica de atuação, i.e., o momento de dipolo magnético produzido capaz gerar torques de controle de atitude, apresenta valores compatíveis com dispositivos disponíveis no mercado. Há que se considerar variações nos parâmetros em versões futuras do dispositivo em etapas futuras para adequação dos protótipos para sua instalação numa placa compatível com um

Cubesat e realização de testes em voo, assim como testar a utilização de materiais alternativos no núcleo do torqueador.

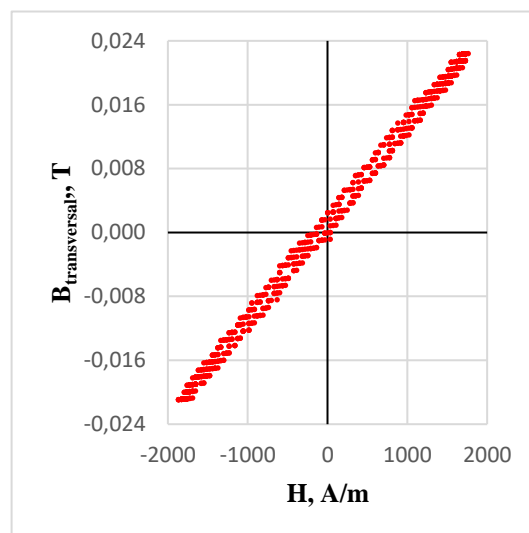


Fig. 13: Medidas de campo magnético para o protótipo T0100-1: densidade de fluxo magnético transversal.

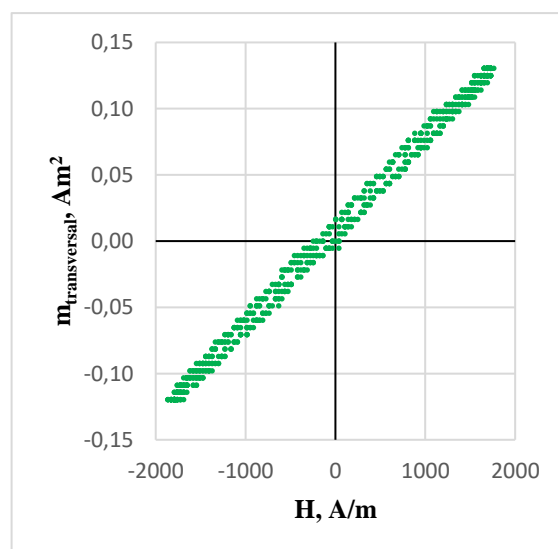


Fig. 14: Medidas de campo magnético para o protótipo T0100-1: momento de dipolo magnético transversal.

6. CONCLUSÃO

A contribuição e o objetivo principal deste trabalho são propor e analisar uma solução para o projeto de um dispositivo um torqueador magnético usando a teoria de projeto axiomática. As definições das características e parâmetros relevantes para o funcionamento adequado do atuador foram obtidas através da metodologia adotada. Requisitos e restrições foram estabelecidos para obter as definições do projeto do protótipo, baseado num núcleo de material nanocristalino, uma inovação construtiva para esse tipo de dispositivo.

Os testes preliminares de validação mostram uma perspectiva promissora para os torqueadores magnéticos projetados a partir da metodologia adotada. Essa estratégia se adapta particularmente a esse dispositivo devido ao grande número de

parâmetros envolvidos a serem definidos em sua concepção, e a necessidade de dividi-los entre requisitos funcionais, restrições construtivas e graus de liberdade do projeto.

Para a continuação desse trabalho, estão sendo projetos e fabricados outros protótipos com diferentes combinações de valores nas características do projeto, conforme o que permite a metodologia, e uso de outro material para o núcleo, visando avaliar as vantagens e desvantagens do uso do material nanocristalino. Além disso, está sendo finalizada uma bancada de testes com ambiente magnético controlado para melhor estimar o desempenho dos atuadores propostos em condições similares àquelas encontradas no espaço. Com esse estudo, espera-se de contribuir com alternativas de baixo custo de dispositivos para projetos de Cubesats, e de desempenho no controle de atitude com precisão adequada aos requisitos das mais diversas missões desses pequenos satélites.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro ao projeto, através do auxílio nº 2019/06174-7. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por bolsas de Iniciação Científica do Programa PIBIC.

REFERÊNCIAS

- Carrara, V.; Varotto, S.E.C. (1995) Projeto de bobinas magnéticas para uso em satélites. Technical Report Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) 5665-NTC-319.
- Farrahi, A.; Sanz-Andrés, A. (2013) Efficiency of hysteresis rods in small spacecraft attitude stabilization. *The Scientific World Journal*. Vol. 2013, Article ID 45957.
- Feynman, R.P. (2019) *Lições de Física: A edição do novo milênio. Volume II: Eletromagnetismo e Matéria*. Porto Alegre: Bookman.
- Gerhardt, D.T.; Palo, S.E. (2010) Passive Magnetic Attitude Control for CubeSat Spacecraft. In: 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, USA.
- Gheiratmand, T.; Hosseini, H.R.M. (2016) Finemet nanocrystalline soft magnetic alloy: Investigation of glass forming ability, crystallization mechanism, production techniques, magnetic softness and the effect of replacing the main constituents by other elements. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 408, pp.177–192.
- Hitachi (2016) FINEMET® Catalog. Hitachi Metals Ltd. Tokyo/Japan.
- Lee, J.; Ng, A.; Jobanputra, R. (2002) On determining dipole moments of a magnetic torquer rod — experiments and discussions. *Canadian Aeronautics and Space Journal*. Vol. 48, No. 1, pp. 61-67.
- Lee, S.-H.; Seo, H.-H.; Rhee, S.-W. (2005) Performance analysis of magnetic torquer rod spacecraft control. In: Proc. of Int. Conf. on Control, Automation, and Systems ICCAS 2005, Gyeonggi-Do, Korea.
- Lincoln Lab. (1965) Design of electromagnetic torquer rod, Massachusetts Institute of Technology (MIT) Report ESD-TDR-65-589.
- Mehrjardi, M. F.; Mirshams, M. (2010) Design and manufacturing of a research magnetic torquer rod. *Contemporary Eng. Sciences*, Vol. 3, No. 5, pp. 227 – 236.
- Ousaloo, H.S. (2013) Hysteresis Nutation Damper for Spin Satellite. *The Open Aerospace Engineering Journal*, Vol. 6, pp. 1-5.
- Markley, F.L.; Crassidis, J.L. (2014) *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. New York: Springer.
- Roohnavazfar, M. *et alli* (2014) Optimization of design parameters of a limited angle torque motor using analytical hierarchy process and axiomatic design theory. *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal*. Vol.2, No.1, pp. 400-414.
- Santoni, F.; Zelli, M. (2009) Passive magnetic attitude stabilization of the UNISAT-4 microsatellite. *Acta Astronautica*. Vol. 65, pp. 792-80.
- Suh, N.P. (1990) *The principles of design*. New York: Oxford University Press.
- Suh, N.P. (1995) Designing-in of Quality Through Axiomatic Design. *IEEE Trans. on Reliability*. Vol. 44, No.2, pp. 256-264.
- Sensys (2020) Sensor FGM3D Matrix of Technical Parameters Datasheet. Sensys Sensorik & Systemtechnologie GmbH, Germany.