

Projeto de bobinas magnéticas para uso em satélites

Valdemir Carrara
Sebastião Eduardo Corsato Varotto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
C.P. 515
12201-970 São José dos Campos, SP - Brasil
val@dem.inpe.br

Resumo- Este trabalho apresenta um roteiro de cálculo e projeto para desenvolvimento de bobinas com núcleo de material ferromagnético para uso em satélites. O equacionamento visa obter um projeto otimizado, levando a uma solução de redução do consumo de energia e com massa reduzida. Foi desenvolvido um programa em Basic para auxílio ao projeto preliminar deste tipo de bobina. Este programa foi utilizado no projeto de numa bobina de 10 Am^2 com núcleo de material ferromagnético. O projeto do núcleo também é apresentado neste trabalho.

INTRODUÇÃO

Os satélites SCD1 e SCD2 controlam sua orientação (ou atitude, isto é, a direção no espaço apontada pelos seus eixos), através de bobinas magnéticas de núcleo de ar, desenvolvidas, projetadas, fabricadas, montadas, testadas e qualificadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [1-3]. A atuação planejada do torque gerado pela interação do campo magnético da bobina com o campo magnético da Terra permite o controle da atitude do satélite. A segunda geração de satélites brasileiros (SCD3 e sensoreamento remoto - SSR) terá a atitude estabilizada e controlada em três eixos, utilizando sensores e atuadores com elevado grau de sofisticação. Não dispensarão, contudo, as bobinas magnéticas, que deverão gerar torques ainda mais elevados, e portanto, com momento magnético superior a 10 Am^2 cada. Bobinas com núcleo de ar possuem grandes dimensões, quando projetadas para gerar tais intensidades de momento magnético, o que sugere a utilização de núcleos ferromagnéticos para esta função.

Em vista disso, iniciou-se em 1988 um programa para adquirir tecnologia de projeto e fabricação de bobinas de núcleo, culminando com o desenvolvimento de uma liga de ferro e níquel, pelo IPT [4], para a produção do núcleo. A bobina projetada naquela época não possuía requisitos de otimização de massa nem consumo de energia, mas atingiu o objetivo de gerar um projeto preliminar.

De forma esquematizada, a bobina é formada pelo *solenóide*, *carretel* e *núcleo*, conforme ilustrado na Fig. 1.

BOBINAS COM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO.

O torque N gerado por uma bobina é função do momento magnético M , e vale:

$$N = M \times B_T \quad (1)$$

onde B_T é a o campo magnético no qual a bobina de momento magnético M está imersa.

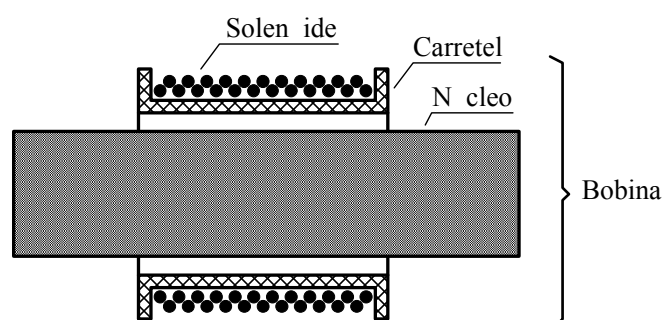


Fig. 1 - Corte de uma bobina com núcleo ferromagnético.

A simulação da atitude e seu controle fornece informações sobre qual deverá ser o momento magnético a ser gerado pelas bobinas. Na simulação, as bobinas não devem trabalhar permanentemente ligadas gerando o torque máximo, mas devem ter um ciclo ao redor de 50%, isto é, 50% do tempo ligadas e 50% desligadas, mesmo considerando o pior caso das perturbações na atitude. Uma vez definido o momento magnético M , procede-se ao cálculo do núcleo.

Cálculo do núcleo. Um material submetido a um campo magnético H apresenta uma densidade de fluxo magnético B , que depende das características magnéticas e da forma da amostra. A relação:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

com B dado em T (Tesla) e H em A/m no MKS, definida como a permeabilidade magnética do material (na forma de um anel), aumenta com a aplicação do campo H , até atingir um valor máximo para em seguida cair assintoticamente. A permeabilidade relativa μ_r é definida como a relação entre a permeabilidade da amostra e a permeabilidade do vácuo, μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ no sistema MKS):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

Já no caso de barras cilíndricas com comprimentos superiores a 10 vezes o diâmetro, a relação B/H fica aproximadamente constante ao se variar o campo externo H [5], devido ao campo desmagnetizante, de sorte que a permeabilidade magnética relativa, conhecida como permeabilidade magnética aparente μ_{ap} , varia pouco.

Nos materiais de alta permeabilidade (μ acima de 10000), a permeabilidade aparente é função exclusiva da geometria, mais precisamente da relação comprimento-diâmetro, e não mais do material [5, 6]. Por outro lado, o momento magnético de uma barra cilíndrica cujo comprimento é muito maior que o diâmetro e submetida a um campo magnético externo H é dado por [7]:

$$M = \left(\frac{B}{\mu_0} - H \right) V R_s \quad (4)$$

sendo V o volume da barra e R_s um fator de redução, compreendido entre 0,75 e 1. Núcleos com relação L/D maior que 20, onde L é o comprimento da barra e D o seu diâmetro, apresentam um fator de redução compreendido entre 0,75 e 0,76. No desenvolvimento do projeto da bobina de núcleo, será admitido que a relação L/D é maior ou igual a 20, e portanto será adotado $R_s = 0,75$.

Substituindo o valor de H de (2) em (4), chega-se a:

$$M = \frac{B}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{ap}} \right) V R_s \quad (5)$$

com M sendo dado em Am^2 . Se a relação comprimento-diâmetro do núcleo for maior que 10, resulta que $\mu_{ap} \gg 1$ e assim pode-se considerar unitário o termo entre parêntesis de (5), o que resulta:

$$M \cong \frac{B}{\mu_0} V R_s \quad (6)$$

Quando submetido a um campo externo H crescente, a densidade de fluxo B da barra cresce de forma aproximadamente proporcional, depois estabiliza-se ao se aproximar de um valor máximo, conhecido como densidade de saturação, B_m . A curva $B \times H$ gera o conhecido diagrama de histerese.

A densidade de saturação não depende da relação L/D do núcleo, mas apenas do material. No caso da liga desenvolvida pelo IPT, *Magperm* IPT 49 [4], este limite está ao redor de 1,5 T. No relatório ESA [7], o limite encontra-se ao redor de 1,0 T. Devido à saturação, de nada adianta gerar

campos magnéticos elevados, pois uma vez saturado, o núcleo não consegue aumentar mais a densidade. Desta forma, é aconselhável gerar campos que provoquem deslocamentos lineares do fluxo B , ficando assim a operação fora da região de saturação. Garante-se também com isso que a remanência permaneça restrita a valores pequenos, minimizando seus efeitos. Nas curvas mostradas no relatório do IPT, o limite da região linear se dá por volta de $B_{max} = 1,2$ T. Com isso, o volume do núcleo - e consequentemente sua massa - torna-se função exclusiva do momento magnético a ser gerado pela bobina. Se então r representar a relação L/D , o volume da barra cilíndrica fica sendo:

$$V = \frac{\pi D^3 r}{4} \quad (7)$$

Substituindo esta última expressão em (6), e também os valores de μ_0 , B_{max} e R_s , obtém-se para o diâmetro do núcleo:

$$D = 0,012114 \sqrt[3]{\frac{M}{r}} \quad (8)$$

Esta expressão foi colocada na forma gráfica na Fig. 2, para valores de momento magnético entre 1 e 50 Am^2 . Os diâmetros resultantes situam-se entre 4 e 18 mm.

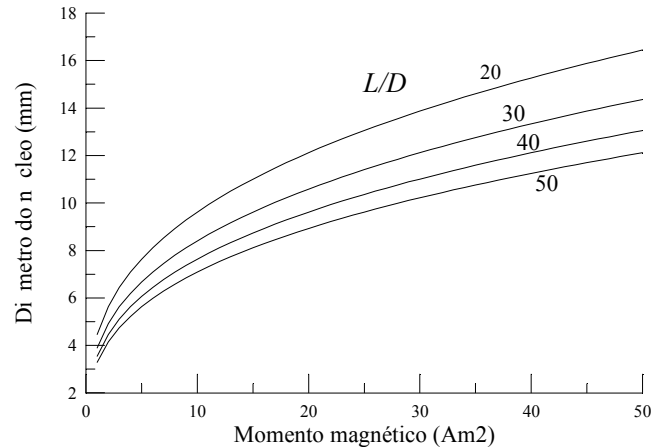


Fig. 2 - Diâmetro do núcleo para material Magperm IPT 49.

A permeabilidade aparente de materiais ferromagnéticos com permeabilidade acima de 10000 pode ser aproximada por um polinômio, em função da relação comprimento-diâmetro, com os pontos fornecidos por [6]:

$$\mu_{ap} = 0,2083r^2 + 5,750r - 8,333 \quad (9)$$

válida para $10 < r < 50$. Infelizmente, os poucos pontos disponíveis não garantem a precisão nos pontos interpolados, e até mesmo a validade do polinômio pode ser questionada.

Para o dimensionamento do núcleo, entretanto, não é necessário grande grau de aproximação, e esta equação pode ser utilizada.

Alguns cálculos preliminares indicaram que um núcleo com relação L/D igual a 30 leva a um bom dimensionamento quer do solenóide, quer do núcleo. Valores maiores desta relação deixam o núcleo muito delgado, o que compromete a rigidez mecânica da bobina. Em virtude destas ponderações, adotou-se $r = 30$ para o projeto do núcleo, resultando um valor de 350 para a permeabilidade aparente, conforme (9). Medidas efetuadas pelo IPT [4] nas barras ferromagnéticas acusaram um valor próximo a 400 para a permeabilidade aparente, no núcleo de L/D igual a 30. O projeto terá então uma margem de segurança ao se adotar para μ_{ap} um valor de 350.

A Tabela I mostra as dimensões do núcleo (D e L) para alguns valores de momento magnético requerido pela bobina, utilizando-se $r = 30$. Os valores encontram-se arredondados.

M (Am ²)	D (mm)	L (mm)
5	6,7	200
10	8,4	252
15	9,6	288
20	10,6	318

Tabela I - Dimensões do núcleo em função de M

Visto que todos os núcleos possuem a mesma relação comprimento-diâmetro e, portanto, a mesma permeabilidade magnética aparente, o campo magnético a ser gerado pelos solenóides também será constante e dado por:

$$H = \frac{B_{max}}{\mu_0 \mu_{ap}} \quad (10)$$

No projeto considerado, para $B_{max} = 1,2$ T e $\mu_{ap} = 350$, resulta para o campo um valor igual a 2730 A/m.

Cálculo do solenóide. O campo magnético gerado no centro de um solenóide de comprimento l_{sol} com n espiras onde circula uma corrente i vale:

$$H = \frac{n i}{l_{sol}} \quad (11)$$

Caso sejam conhecidas a potência máxima P_{max} da bobina e a tensão de operação U , a corrente e a resistência apresentada pela bobina valem, respectivamente:

$$i = \frac{P_{max}}{U} \quad (12)$$

e

$$R = \frac{U^2}{P_{max}} \quad (13)$$

O diâmetro do fio deve ser selecionado de forma que a corrente da bobina seja inferior à corrente nominal indicada para esta bitola do fio, ou ainda pode-se utilizar a expressão abaixo, que relaciona a corrente do solenóide com o diâmetro do fio:

$$d_{fio} = \sqrt{\frac{i}{v}} \quad (14)$$

com d_{fio} em metros e a corrente i dada em Ampéres. Esta relação foi obtida através de aproximação dos valores fornecidos por um catálogo de fios, que resultou para o fluxo de corrente v o valor de $2,3 \cdot 10^{-6}$ A/m².

A resistência por unidade de comprimento do fio, ρ depende apenas do seu diâmetro, e a seguinte relação é válida para fios de cobre:

$$\rho = \frac{K}{d_{fio}^2} \quad (15)$$

sendo K a resistividade do fio ($K = 2.195 \cdot 10^{-8}$ Ω m, para fios de cobre).

O comprimento do fio fica automaticamente determinado pois a resistência é fornecida por (13) e a resistência linear é função da bitola escolhida, então:

$$l_{fio} = \frac{R}{\rho} \quad (16)$$

Agora pode-se obter o número de espiras, desde que seja admitido inicialmente um diâmetro médio d_{sol} para o solenóide:

$$n = \frac{l_{fio}}{\pi d_{sol}} \quad (17)$$

Finalmente, chega-se ao comprimento do solenóide, l_{sol} , invertendo-se (11). Por motivos construtivos, o fio deve ser enrolado no solenóide começando e terminando em uma das extremidades, tendo portanto um número inteiro de camadas:

$$n_{cam} = \text{int} \left(\frac{d_{iso}}{l_{sol}} n \right) \quad (18)$$

No cálculo do número de camadas e do diâmetro médio do solenóide, deve-se considerar o diâmetro do fio com

camada isolante, d_{iso} , e não o diâmetro do fio nú (d_{fio}). O diâmetro do solenóide pode agora ser obtido de forma mais precisa, considerando-se a relação:

$$d_{sol} = d_{int} + [1 + 0,87(n_{cam} - 1)] d_{iso} \quad (19)$$

onde d_{int} é o diâmetro interno do solenóide. O fator de redução 0,87 leva em conta a acomodação do fio das camadas superiores sobre as inferiores.

As Equações (17) a (19) devem ser iteradas, de forma a fazer convergir o valor de d_{sol} . É importante notar, também, que os valores do número de espiras n e o número de camadas n_{cam} são normalmente inteiros e portanto precisam ser truncados ou arredondados. Para que as terminações do fio localizem-se nas extremidades do carretel, o valor do número de espiras deve ser um múltiplo do número de camadas. Os valores de projeto da bobina serão dados por:

$$\bar{n} = n_{cam} \text{ int}(n / n_{cam} + 0,5) \quad (20)$$

$$d_{ext} = d_{int} + 2 [1 + 0,87 (n_{cam} - 1)] d_{iso} \quad (21)$$

$$l_{fio} = \pi \bar{n} d_{sol} \quad (22)$$

$$R = \frac{K}{d_{fio}^2} l_{fio} \quad (23)$$

$$l_{sol} = \frac{\bar{n}}{n_{cam}} d_{iso} \quad (24)$$

$$H = \frac{\bar{n} i}{l_{sol}} \quad (25)$$

$$M = \mu_r H V R_s \quad (26)$$

que fornecem, respectivamente, o número de camadas, o diâmetro externo do solenóide, o comprimento do fio, a resistência da bobina, o comprimento do solenóide, o campo magnético gerado pelo solenóide e o momento magético induzido no núcleo.

Exemplo de cálculo de uma bobina com núcleo. As relações obtidas aqui foram introduzidas num programa em Basic, que foi usado em um exemplo, onde foi considerado um núcleo de material Magperm 49, com diâmetro de 8,4 mm e comprimento 252 mm (conforme a Tabela I). Foi admitido um coeficiente de permeabilidade relativa de $\mu_r = 350$, obtido de (9), e um fator de redução de 0,75. Os valores de entrada considerados foram: tensão de alimentação de 5 V, potência máxima admitida para a bobina igual a 0,25 W, espaçamento entre o núcleo e o diâmetro interno do

solenóide de 2 mm. Os resultados obtidos pelo programa são mostrados na Tabela II.

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este relatório apresenta um roteiro para cálculo, dimensionamento e projeto de bobinas de núcleo para utilização em controle de atitude de satélites. A principal motivação deste trabalho foi documentar diversos projetos de bobinas que já foram desenvolvidas pelo INPE para os satélites SCD1 e SCD2, bem como para aqueles ainda em fase de desenvolvimento, como os satélites SCD3, SACI e SSR. Foram incluídas formulações para o projeto de bobinas com núcleo de material ferromagnético e desenvolvido um programa em Basic para dimensionamento de bobinas com núcleo. O programa foi utilizado no projeto de uma bobina de núcleo com 10 Am².

	Parâmetro	Variável	Valor
Núcleo	Diâmetro	D	8,4 mm
	Comprimento	L	252 mm
	Perm. aparente	μ_{ap}	350
Fio	Diâm. do fio nú	d_{fio}	0,160 mm
	Diâm. do fio	d_{iso}	0,213 mm
	Comprimento	l_{fio}	117 m
Solen.	Diâmetro interno	d_{int}	12,4 mm
	Diâmetro médio	d_{sol}	14,6 mm
	Comprimento	l_{sol}	44,9 mm
	Núm. de camadas	n_{cam}	12
	Núm. de espiras	n	2532
	Campo gerado	H	2819 A/m
Bobina	Tensão de oper.	U	5 V
	Resistência	R	100 Ω
	Corrente de oper.	i	0,050 A
	Pot. dissipada	P	0,250 W
	Momento mag.	M	10,33 Am ²

Tabela II - Valores de projeto da bobina de 10 Am²

REFERÊNCIAS

- [1] Santana, C. E.; Carrara, V.; Ferreira, L. D. D. "SCD2 - Attitude Control Specification" São José dos Campos, INPE, 1989. (A-ETC-0067).
- [2] Ferreira, L. D. D.; Carrara, V. "Spin rate coil specification" São José dos Campos, INPE, 1989. (A-ETC-0079).
- [3] Ferreira, L. D. D.; Carrara, V. "Spin axis coil specification" São José dos Campos, INPE, 1989. (A-ETC-0080).
- [4] Landgraf, F. J. G. *Parecer técnico 27.403*. São Paulo, IPT, 1989.
- [5] Concílio, G.; Landgraf, F. J. G.; Rodrigues, D.; Teixeira, J. C.; Lima, P. S. P. *Projeto e fabricação de núcleo ferromagnético de bobina de torque usada como elemento atuador em satélites artificiais*. Seminário sobre Materiais Avançados na Indústria Aeroespacial, 1º, São José dos Campos, nov. 1989.
- [6] Bozorth, R. M. *Ferromagnetism*. New York, Van Nostrand, 1951.
- [7] Harris, R. S. *Study of attitude control systems using the Earth's magnetic field at synchronous altitudes: final report*. Bristol, ESA, 1978. (ESA, ESS/SS 834)