

PROJETO DE BOBINAS DE HELMHOLTZ EM 3 EIXOS PARA SIMULAÇÃO DE CAMPO GEOMAGNÉTICO

Valdemir Carrara, val@dem.inpe.br¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12227-010

Resumo: Neste trabalho é apresentado um projeto de um sistema de bobinas de Helmholtz em 3 eixos, para simulação do campo magnético terrestre no ambiente espacial. Tal sistema visa atender as necessidades do Laboratório de Simulação da Divisão de Mecânica Espacial e Controle do INPE na geração de campos magnéticos controlados para calibração e testes de sensores, além de servir para simulação de sistemas embarcados de controle de atitude e validação de algoritmos de simulação. Sistemas compostos por 3 bobinas de Helmholtz em direções ortogonais são amplamente empregados em situações que requerem geração de campo magnético de magnitude e direção controladas, e encontram aplicações em instrumentação, calibração de sensores, fabricação e testes de equipamentos e sistemas de desmagnetização. Na área espacial, tais bobinas servem para calibrar sensores magnéticos e simular a movimentação do satélite com relação ao campo magnético da Terra. Descreve-se o projeto de um sistema composto por 3 pares de bobinas de Helmholtz quadradas com dimensões de cerca de 1 metro e com capacidade de geração de campo em direções ortogonais, formando uma estrutura cúbica. São apresentados os projetos mecânico e elétrico do conjunto de bobinas. É descrito o equacionamento que permite calcular o vetor campo magnético gerado em qualquer ponto no interior do volume cúbico, bem como o desvio do campo na região central do volume. A separação entre os pares é calculada de forma a gerar um campo uniforme no centro do cubo. O projeto visa obter linearidade do campo para correntes de até 3 A, e um valor máximo do campo na região central de 1200 mG em qualquer direção. Foram feitos dois enrolamentos em cada bobina, o que permite que elas possam operar tanto em série quanto em paralelo. Além disso, o par de bobinas de um dos eixos pode igualmente ser acionado em série ou paralelo, o que permite certo ajuste na impedância e indutância do sistema. O controle do campo será efetuado por uma fonte programável de tensão/corrente, de alta precisão, já que os requisitos de projeto exigem uma resolução do campo da ordem de 1 mG.

Palavras-chave: bobina de Helmholtz, campo magnético, simulação

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o equacionamento necessário para o projeto de um sistema de bobinas de Helmholtz em 3 eixos. Tal sistema visa atender as necessidades do Laboratório de Simulação da Divisão de Mecânica Espacial e Controle do INPE na geração de campos magnéticos controlados para calibração e testes de sensores, além de servir para simulação de sistemas embarcados e validação de algoritmos de simulação.

Sistemas compostos por 3 bobinas de Helmholtz em direções ortogonais são amplamente empregados em situações que requerem geração de campo magnético de magnitude e direção controladas, e encontram aplicações em instrumentação, calibração de sensores, fabricação e testes de equipamentos e sistemas de desmagnetização. Na área espacial, tais bobinas servem para calibrar sensores magnéticos e simular a movimentação do satélite com relação ao campo magnético da Terra. Existem diversos fabricantes destas bobinas (MEDA, 2008; Laboratorio Eletrofísico, 2008), em dimensões pequenas (150 mm em Shirai, 2004), medianas (1 a 4 m em MEDA, 2008), e ainda maiores (13 m em NASA, 2009), em formatos circulares ou quadrados (Laboratorio Eletrofísico, 2008).

Este trabalho visa o projeto de uma bobina de Helmholtz quadrada em 3 eixos com dimensões de cerca de 1 m. As seções seguintes apresentam o equacionamento teórico, o projeto mecânico e o projeto eletrônico do conjunto de bobinas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma bobina de Helmholtz em um eixo consiste de dois enrolamentos circulares com eixos alinhados e separados por uma distância igual ao raio das bobinas. O campo magnético gerado por uma bobina pode ser calculado partindo-se da lei de Biot-Savart, dada por:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}, \quad (1)$$

no qual μ_o é a permeabilidade do vácuo, I é a corrente elétrica num elemento retilíneo infinitesimal $d\mathbf{l}$, \mathbf{r} é o vetor que vai do elemento ao ponto onde se encontra o campo $d\mathbf{B}$ e r é o módulo de \mathbf{r} , como visto à esquerda na Fig. (1). O campo gerado por um fio retilíneo, visto à direita na Fig. (1), pode agora ser obtido integrando-se o campo gerado pelo elemento:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}. \quad (2)$$

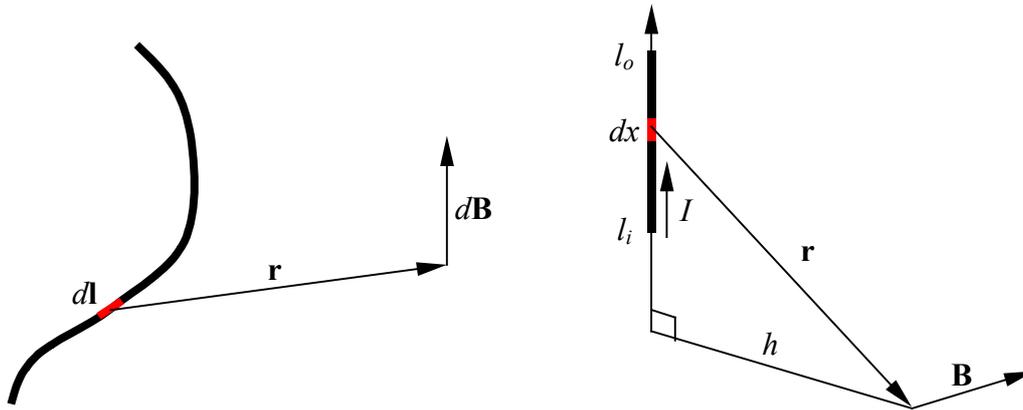


Figura 1. Campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa por um elemento retilíneo infinitesimal (esquerda) e num segmento retilíneo (direita).

Admitindo coordenadas cilíndricas, a integral é reescrita na forma:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \int_{l_i}^{l_o} \frac{h}{(h^2 + x^2)^{3/2}} dx \mathbf{u}, \quad (3)$$

que deve ser integrada entre os extremos l_i e l_o de entrada e saída da corrente, respectivamente, e onde \mathbf{u} é o vetor unitário perpendicular a \mathbf{r} e a $d\mathbf{l}$, ou seja:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{lr \sin \theta} = \frac{\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{lh}, \quad (4)$$

com \mathbf{l} sendo o vetor de l_i a l_o , e θ o ângulo entre \mathbf{l} e \mathbf{r} . Efetuando-se a integral, tem-se

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi h} \left[\frac{l_o}{(h^2 + l_o^2)^{1/2}} - \frac{l_i}{(h^2 + l_i^2)^{1/2}} \right] \mathbf{u}. \quad (5)$$

As expressões do campo não são válidas isoladamente, uma vez que não se consegue gerar uma corrente estável em um segmento de fio. Porém ela pode ser usada desde que o fio forme uma malha fechada. Considera-se, então, uma malha quadrada formada por quatro segmentos de fio unidos pela extremidade, de lados $2l$. O campo magnético gerado no plano desta bobina, na posição (x, y) relativa ao centro, é dado pela soma das contribuições dos quatro lados, tal que os valores de h , l_i e l_o são dados pela Tab. (1).

Tabela 1. Valores de h , l_i e l_o em relação ao segmento considerado no cálculo do campo.

Lado	H	l_i	l_o
1	$l - x$	$-l - y$	$l - y$
2	$l - y$	$-l + x$	$l + x$
3	$l + x$	$-l + y$	$l + y$
4	$l + y$	$-l - x$	$l - x$

O campo magnético gerado no centro da bobina é relativamente uniforme, mas varia bastante ao se aproximar do fio. A Fig. (2) ilustra a variação do campo numa pequena região central da bobina, onde cada nível de cinza (10 ao todo) indica 1% de variação com relação ao campo no centro. Com isso, pode-se afirmar que o campo permanece com variação inferior a 10% dentro de um raio de $0.37 l$ a partir do centro. Em termos de área, este valor representa cerca de 11% da área interna.

Para o dimensionamento da bobina de Helmholtz será necessário avaliar como se comporta o campo magnético na região central entre duas bobinas. Para isso, calcula-se o campo gerado por uma bobina ao longo do eixo central perpendicular ao seu plano. Nesta situação, o campo gerado por cada lado do quadrado é adicionado vetorialmente aos demais. Devido à simetria da bobina, o campo gerado por lados opostos é reforçado na direção axial, enquanto que é cancelado na direção perpendicular ao eixo. Como os limites de integração são $l_i = -l$ e $l_o = l$, então o campo gerado por um único segmento é simétrico em relação ao fio e resulta (Charitat e Graner, 2003):

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{2\pi} \frac{l}{h(h^2 + l^2)^{1/2}} \mathbf{u}. \quad (6)$$

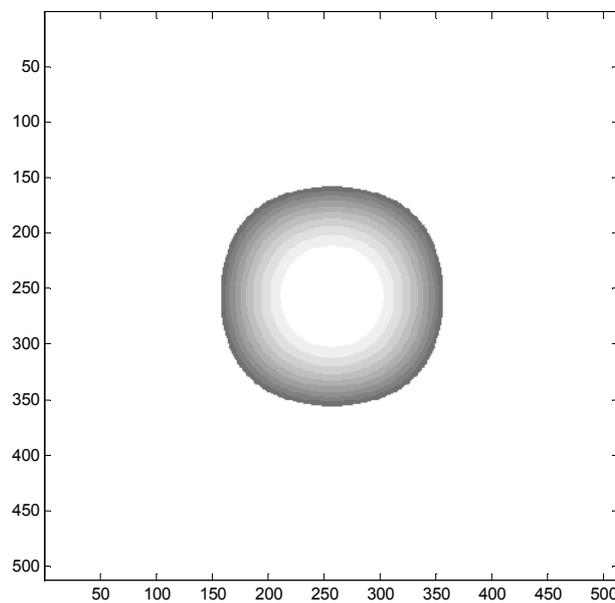


Figura 2. Diferença do campo magnético gerado por uma bobina quadrada com relação ao campo no centro, com até 10% de diferença.

Considerando agora a posição ao longo do eixo central da bobina, a distância radial será dada por $h = (x^2 + l^2)^{1/2}$, e, efetuando-se a projeção deste campo ao longo deste eixo, tem-se para o campo gerado pelos quatro segmentos:

$$B = 2 \frac{\mu_o I}{\pi} \frac{l^2}{(x^2 + l^2)(x^2 + 2l^2)^{1/2}}. \quad (7)$$

As duas bobinas ao longo do eixo devem ser idênticas, com eixos coincidentes, e separadas por uma distância $2d$ ao longo deste eixo. Fixando um sistema de coordenadas no ponto mediano do eixo entre as duas bobinas, o campo magnético neste eixo será então dado por:

$$B = 2 \frac{\mu_o I}{\pi} \left[\frac{l^2}{[(x+d)^2 + l^2][(x+d)^2 + 2l^2]^{1/2}} + \frac{l^2}{[(x-d)^2 + l^2][(x-d)^2 + 2l^2]^{1/2}} \right], \quad (8)$$

na qual x representa agora a distância com relação ao ponto médio entre as duas bobinas. As bobinas de Helmholtz encontradas no mercado adotam uma separação d que pode variar desde $l/2$ até l , (Laboratório Eletrofísico, 2008; MEDA, 2008). Porém, para que sejam minimizadas as variações do campo ao longo do eixo de simetria, impõe-se que a

segunda derivada seja nula no ponto central, e isso permite estabelecer uma relação entre a separação das bobinas e o comprimento l (Spencer e Davis, 1999):

$$d = 0.544506 l. \quad (9)$$

O comportamento do campo pode ser visto na Fig. (3), para três configurações diferentes: $d = 0.5 l$, $d = 0.544506 l$ e $d = 0.6 l$. Percebe-se claramente a uniformidade do campo na região central na curva otimizada. Para esta curva, o deslocamento máximo na direção do eixo no qual o campo fica restrito a uma variação de 1% do valor central é de aproximadamente $\pm 0.343 l$. Porém, se for admitido que certa variação do campo é suportável, então com $d = 0.61 l$ consegue-se manter a variação menor do que 1% em distâncias de até $\pm 0.552 l$ com relação ao centro. Caso, ainda, seja possível suportar esta mesma variação de 1%, porém não em relação ao valor do centro, mas sim em toda a extensão da linha de simetria, então com $d = 0.638 l$ consegue-se um máximo de $\pm 0.597 l$.

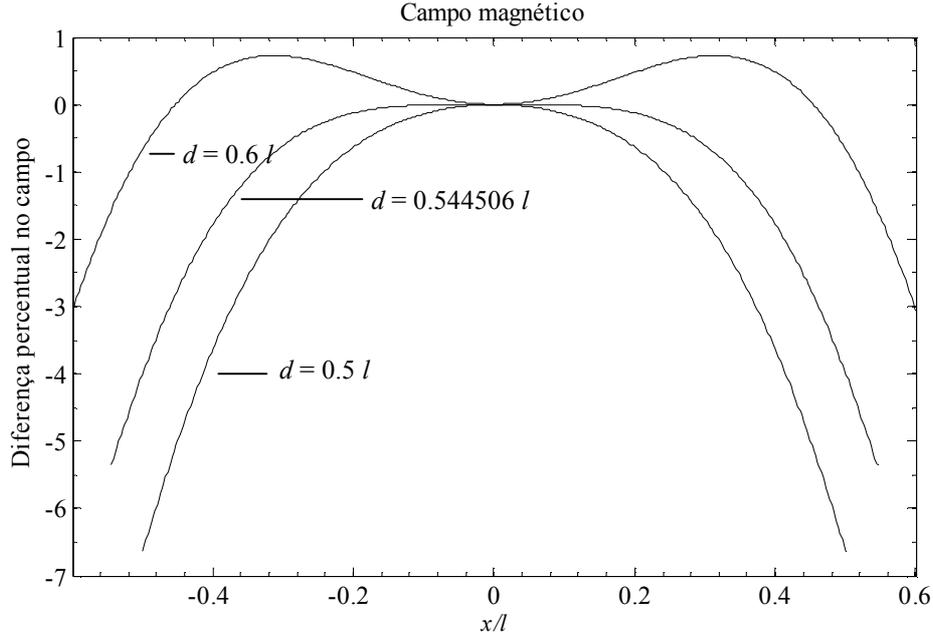


Figura 3. Diferenças no campo gerado ao longo do eixo central de simetria por duas bobinas com diferentes distâncias de separação.

No caso mais geral, o campo deve ser calculado em qualquer posição do espaço, e, neste caso, deve-se estabelecer uma geometria que permita este cálculo. Seja então \mathbf{w}_i o vetor que indica o início do segmento de um dos fios da bobina, e \mathbf{w}_o o vetor que posiciona o término do segmento, como definido na Fig. (4). Seja também \mathbf{p} o vetor que indica o ponto onde se deseja calcular o campo \mathbf{B} . O vetor que define a direção do fio é então dado por $\mathbf{l} = \mathbf{w}_o - \mathbf{w}_i$. Seja também os vetores $\mathbf{r}_i = \mathbf{p} - \mathbf{w}_i$, e $\mathbf{r}_o = \mathbf{p} - \mathbf{w}_o$, que fornecem a posição de \mathbf{B} relativo ao início e término do segmento. Nota-se que $l_i = -\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{l} / l$, e que $l_o = -\mathbf{r}_o \cdot \mathbf{l} / l$, onde o sinal “ \cdot ” indica o produto interno ou produto escalar. Vale ainda ressaltar que $r_i = (h^2 + l_i^2)^{1/2}$ e $r_o = (h^2 + l_o^2)^{1/2}$, no qual r_i e r_o são os módulos dos vetores \mathbf{r}_i e \mathbf{r}_o . O campo magnético fica então:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \left[\frac{\mathbf{r}_i}{r_i} - \frac{\mathbf{r}_o}{r_o} \right] \cdot \mathbf{l} \frac{1}{h l} \frac{\mathbf{l} \times \mathbf{r}_i}{h l_i}. \quad (10)$$

Definindo agora o vetor \mathbf{h} como perpendicular à reta que passa pelo fio e que vai até o ponto onde o campo é calculado, tem-se:

$$\mathbf{h} = \mathbf{r}_i - \frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{l}}{l^2} \mathbf{l} = \frac{(\mathbf{l} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{r}_i - (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{l}) \mathbf{l}}{(\mathbf{l} \cdot \mathbf{l})}, \quad (11)$$

que permite obter, dado que $h^2 = \mathbf{h} \cdot \mathbf{h}$:

$$l^2 h^2 = (\mathbf{l} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i) - (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{l})(\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{l}). \quad (12)$$

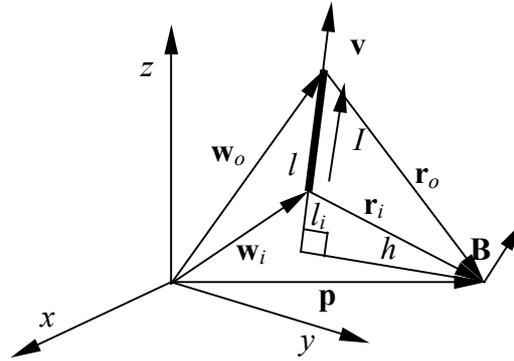


Figura 4. Campo magnético gerado na posição p pela corrente elétrica num segmento retilíneo.

Tem-se assim o campo magnético na forma vetorial para um segmento:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \left[\frac{\mathbf{l} \cdot \mathbf{r}_i}{r_i} - \frac{\mathbf{l} \cdot \mathbf{r}_o}{r_o} \right] \frac{\mathbf{l} \times \mathbf{r}_i}{(\mathbf{l} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i) - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{r}_i)^2}. \quad (13)$$

Se for fixado um sistema de coordenadas no ponto mediano ao longo do eixo de simetria das duas bobinas, como indicado na Fig. (5), tal que z coincide com este eixo, e x e y são paralelos aos lados das bobinas, o campo vetorial será dado por:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \sum_{k=1}^8 \left[\frac{\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{r}_{ki}}{r_{ki}} - \frac{\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{r}_{ko}}{r_{ko}} \right] \frac{\mathbf{l}_k \times \mathbf{r}_{ki}}{(\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{l}_k)(\mathbf{r}_{ki} \cdot \mathbf{r}_{ki}) - (\mathbf{l}_k \cdot \mathbf{r}_{ki})^2}, \quad (14)$$

onde $\mathbf{l}_k = \mathbf{w}_{ko} - \mathbf{w}_{ki}$, $\mathbf{r}_{ki} = \mathbf{p} - \mathbf{w}_{ki}$, $\mathbf{r}_{ko} = \mathbf{p} - \mathbf{w}_{ko}$, e tal que \mathbf{w}_{ki} e \mathbf{w}_{ko} representam as coordenadas vetoriais dos vértices que definem os 8 segmentos das duas bobinas, apresentados na Tab. (2).

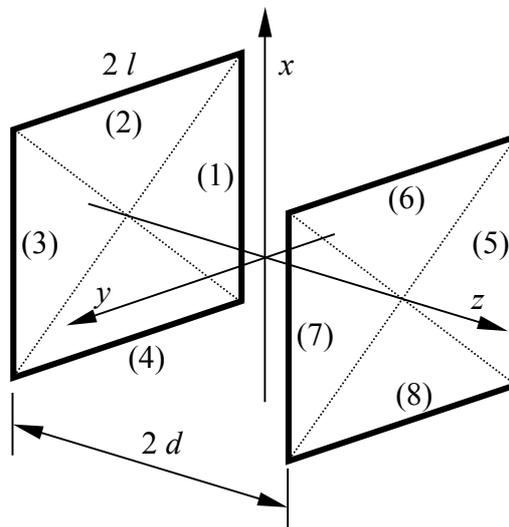


Figura 5. Sistema de coordenadas fixado no ponto mediano do eixo de simetria das bobinas.

No centro das bobinas (origem do sistema de coordenadas) o campo magnético tem direção do eixo z, e módulo B_o , dado por:

$$B_o = 4 \frac{\mu_o I}{\pi} \frac{l^2}{(d^2 + l^2)(d^2 + 2l^2)^{1/2}}, \quad (15)$$

O comportamento do campo na região ao redor do centro é mostrado na Fig. 6. As regiões claras (branco ou cinza) correspondem a diferenças no campo inferiores a 1%, isto é, o módulo da diferença vetorial entre o campo calculado

numa dada posição e o valor do campo na origem, B_o , é menor do que 1%. A Fig. (6a), à esquerda, mostra o desvio no plano $x-z$, enquanto que a Fig. (6b) à direita mostra o erro no plano $x-y$. Foi adotado, nos cálculos, que $l = 256$ e $d = 0.544506 l = 139$. Tem-se, assim, um cubo com lados próximos de $0.4 l$ e centrado na origem, dentro do qual o erro é bastante pequeno.

Tabela 2. Valores de w_{ki} e w_{ko} referentes aos 8 segmentos das bobinas

k	w_{ki}	w_{ko}
1	$(-l, -l, -d)$	$(l, -l, -d)$
2	$(l, -l, -d)$	$(l, l, -d)$
3	$(l, l, -d)$	$(-l, l, -d)$
4	$(-l, l, -d)$	$(-l, -l, -d)$
5	$(-l, -l, d)$	$(l, -l, d)$
6	$(l, -l, d)$	(l, l, d)
7	(l, l, d)	$(-l, l, d)$
8	$(-l, l, d)$	$(-l, -l, d)$

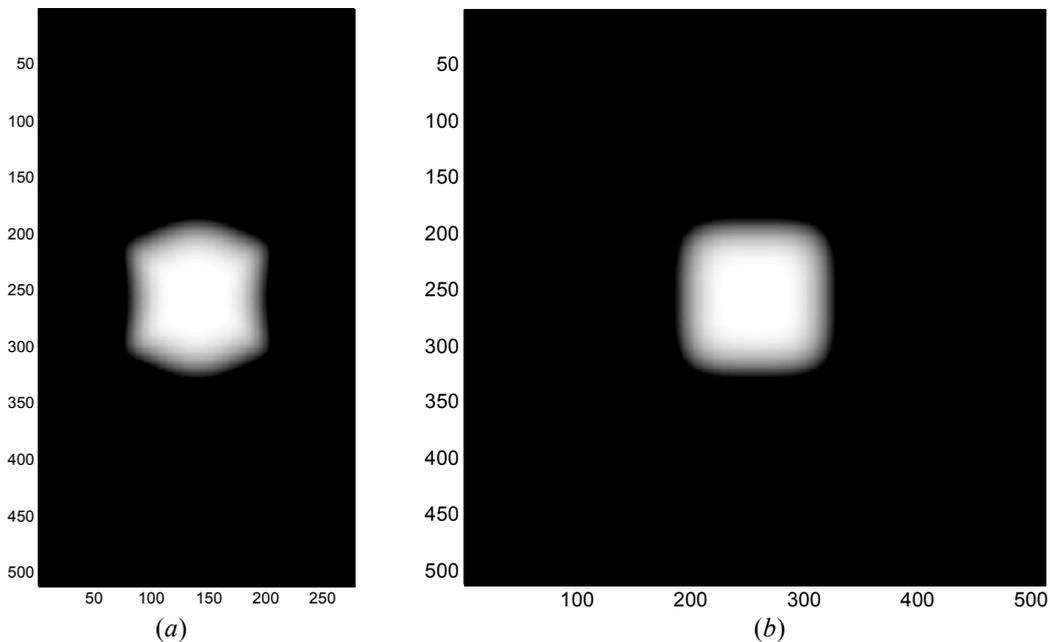


Figura 6. Desvio do campo na região central com relação ao campo no centro, nos planos $x-z$ (a) e $x-y$ (b).

Admitindo agora que $d = s l$, onde s é um escalar, tem-se que o módulo do campo na origem do sistema fica:

$$B_o = 4 \frac{\mu_o I}{\pi l} \frac{1}{(s^2 + 1)(s^2 + 2)^{1/2}}, \quad (16)$$

e, finalmente, adotando $s = 0.544506$, tem-se que

$$B_o \cong 2,0359 \frac{\mu_o I}{\pi l}. \quad (17)$$

3. PROJETO ELETRO-MECÂNICO

Uma vez que a bobina irá operar no ar, cuja permeabilidade é próxima à do vácuo, então $\mu_o = 4 \pi 10^{-7} \text{ T m /A}$, e com isso pode-se determinar a corrente elétrica na situação de máximo campo na origem, B_{\max} , a partir da Eq. (17), como:

$$I \cong 1,228 10^6 l B_{\max}, \quad (18)$$

com l dado em metros e B_{\max} em Tesla. A bobina deverá ser capaz de simular o campo magnético terrestre em qualquer direção, e isto significa que o valor máximo do campo no centro deverá ser tal a compensar o campo magnético terrestre e, eventualmente, invertê-lo na direção oposta. Uma vez que o campo magnético terrestre assume valores de no máximo 600 mG na superfície da Terra, resulta então que B_{\max} deverá ser igual a 1200 mG, ou $0,12 \cdot 10^{-3} \text{T}$. Este valor poderá ser menor se for considerado que o campo, no local de operação da bobina, é substancialmente inferior a 600 mG em virtude da anomalia magnética do Atlântico Sul. Tem-se assim que

$$I \cong 147,4 l. \quad (19)$$

O diâmetro do fio esmaltado de cobre pode ser colocado em função da corrente i em cada espira (Carrara e Varotto, 1996):

$$d = \sqrt{\frac{i}{v}}, \quad (20)$$

onde v vale aproximadamente $2,3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. Além disso, a resistência elétrica do fio depende apenas do comprimento e do diâmetro do fio e pode ser aproximada por:

$$R = \frac{K}{d_f^2} L, \quad (21)$$

sendo K a resistividade do cobre ($K = 2,195 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$) e L o comprimento total do enrolamento, calculado por $L = 8 n l$, onde n é o número de espiras e l a metade da largura do solenóide (quadrado). A relação

$$I = n i \quad (22)$$

estabelece uma correspondência entre a corrente por espira i e a corrente total I no enrolamento. Como a bobina deverá gerar um campo quase estático, com variações lentas, então se pode desprezar a impedância da indutância, e considerar apenas a resistência do fio, conforme a lei de Ohm $U = R i$, na qual U é a tensão aplicada ao enrolamento. Substituindo as quatro expressões anteriores nesta última, e isolando o número de espiras, chega-se a

$$n = \frac{U}{8K l v}, \quad (23)$$

que depende apenas da tensão máxima de operação U e da semi largura l das bobinas. Uma vez definido o número de espiras, procede-se ao cálculo do mínimo diâmetro do fio, da resistência total, do comprimento do fio, da corrente máxima e da potência dissipada ($P = R i^2$) sob corrente máxima. De posse destes valores, encontra-se na tabela de fios de cobre esmaltados com diâmetros normalizados AWG qual é o fio que melhor se adapta aos valores. Para garantir um espaço no interior das bobinas que seja aceitável para experimentos e testes de sensores, adotou-se bobinas de 1 m de lado ($l = 0,5 \text{ m}$). Com a finalidade de acomodar possíveis alterações no projeto da eletrônica de controle, foi adotado um enrolamento, em cada bobina, com o dobro do número necessário de espiras, e com derivação central. Tem-se assim a possibilidade de se ligar os dois enrolamentos em série ou paralelo, ou ainda pode-se utilizar os enrolamentos para gerar correntes em sentido contrário (não simultaneamente, é claro), além de permitir também que um dos enrolamentos compense o campo magnético terrestre no local, enquanto que o outro geraria a magnitude desejada do campo. Um perfil de alumínio em U com 14 mm de largura e 7 mm de altura será suficiente para acomodar o solenóide. Para permitir a possibilidade de se gerar campos magnéticos mais elevados, e também para reduzir a resistência ôhmica da bobina a fim de evitar efeitos térmicos, decidiu-se empregar um fio de diâmetro ligeiramente maior do que aquele obtido com uma tensão de alimentação de 5 V, e com isso tem-se o resultado final das características de cada bobina, apresentadas na Tab. 3.

As principais características que o projeto mecânico da estrutura deverá possuir são:

- uso de material paramagnético em todos os componentes
- vão interno totalmente livre e desimpedido, de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$, exceto nos cantos de cada quadrado
- dimensões que permitam montagem de um eixo sobre o outro
- ser desmontável
- utilizar um perfil de alumínio para as armações das bobinas que tenha dimensões internas que consigam acomodar com folga os dois enrolamentos.
- possuir um suporte para conector elétrico em cada uma das bobinas.

- ser ajustável na distância entre bobinas paralelas, com distâncias de 500 mm a 700 mm, ou então com possibilidade de ajuste em duas posições fixas de 545 mm e $d = 638$ mm.
- cantos ligeiramente arredondados nos vértices dos quadrados que servem de armações para as bobinas, para evitar tensões elevadas de dobramento no fio de cobre que poderão romper a camada de esmalte.

Tabela 3. Características finais do projeto das bobinas de Helmholtz

Característica	Unidade	Valor
Meia-largura do solenóide (l)	m	0,5
Número de espiras por enrolamento (n)		25
Comprimento do fio por enrolamento (L)	m	100
Bitola	AWG	15
Diâmetro do fio (d_f)	mm	1,450
Massa de cobre de cada enrolamento	kg	1,47
Corrente elétrica por espira (i)	A	2,95
Resistência máxima por enrolamento (R)	Ohm	1,066
Potência elétrica máxima (P)	W	9,28
Seção quadrada	mm	15,1 x 7,6
Número de espiras por camada		10
Número de camadas		5

Com base nos requisitos estabelecidos para a estrutura, foi empregado um perfil de alumínio em U de abas desiguais, com dimensões de 3/4" por 1/2" e espessura de 1/16". A massa total de fio esmaltado é de $6 \cdot 2 \cdot 1,47 \approx 17,64$ kg.

A indutância das bobinas pode ser calculada de diversas formas, que são aproximações e simplificações de expressões diferenciais mais gerais. Em Asuni, 2009, encontra-se o cálculo da indutância de uma bobina quadrada:

$$L_s \approx n^2 \frac{2w\mu_o\mu_r}{\pi} \left[\ln\left(\frac{w}{a}\right) - 0.77401 \right] \quad (24)$$

onde L_s é a indutância em Henry, n é o número de espiras, w é o comprimento dos lados da bobina ($w = 2l$) em metros, a é o raio do fio em metros ($a = d_f/2$), μ_o é a permeabilidade do vácuo e μ_r é a permeabilidade relativa do meio (neste caso, o ar). Adotando o valor da permeabilidade relativa do ar e do alumínio como iguais a 1 ($\mu_{ar} = 1,00000037$ e $\mu_{Al} = 1,00002$), o cálculo da indutância da bobina interna fornece ($n = 25$, $w = 1$ m, $a = 0,72 \cdot 10^{-3}$ m, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) $L_s = 3.23 \cdot 10^{-3}$ H.

Quando duas bobinas são conectadas em série com eixos coincidentes, surge uma indutância mútua entre elas. Spencer e Davis (Spencer e Davis, 1999) sugerem então que se leve em conta as indutâncias própria e mútua no cálculo. Se a separação entre as bobinas for ótima (ou seja, quando $s = 0.544506$), então a indutância pode ser calculada por:

$$L_s \approx 2n^2 l (\widehat{\Phi}_{11} + \widehat{\Phi}_{12}), \quad (25)$$

no qual l é o comprimento dos lados ($l = 1$ m), e $\widehat{\Phi}_{11}$ e $\widehat{\Phi}_{12}$ são os fluxos magnéticos normalizados próprio e mútuo, respectivamente, e valem, segundo Spencer e Davis: $\widehat{\Phi}_{11} = 3,3 \cdot 10^{-6}$ H/m e $\widehat{\Phi}_{12} = 2,9 \cdot 10^{-7}$ H/m. Tem-se com isso que a indutância resulta $L_s = 4.49 \cdot 10^{-3}$ H, cerca de 40% maior do que aquela calculada sem levar em conta a indutância mútua.

4. REQUISITOS PARA O PROJETO ELETRÔNICO

As bobinas deverão ser controladas em corrente, de forma a gerar o campo magnético necessário. Embora um projeto eletrônico adequado seja necessário, este será realizado posteriormente, em outro trabalho. Porém, são estabelecidas aqui as principais técnicas de controle, discute-se as diversas possibilidades de eletrônica, e apresentam-se as possibilidades alternativas de caracterização e calibração do conjunto, além dos requisitos necessários ao controle.

Existem poucos trabalhos na literatura acerca do controle da corrente elétrica em bobinas de Helmholtz, embora as técnicas usuais para controle de corrente (em motores DC, por exemplo), possam ser adotadas aqui. Em MEDA (MEDA, 1999), são apresentadas técnicas de compensação ativas para anular o campo na região central das bobinas. O controle usa informações colhidas de um magnetômetro de 3 eixos ligeiramente descentralizado, de forma a não interferir no experimento, para dosar a corrente de forma a compensar (anular) o campo medido.

Park e outros (2002), e também Shirai, 2004, apresentam igualmente a compensação por controle realimentado, para uso em calibração de sensores e aferição de instrumentos de medição. A vantagem do controle realimentado reside na precisão e estabilidade atingidas. Contudo, apresenta como desvantagens a necessidade de um sensor permanentemente alocado na malha de realimentação, e um espaço a ser reservado para o sensor perto do centro das bobinas. Na verdade, a principal desvantagem do controle realimentado é que as medidas efetuadas pelo sensor podem ser influenciadas por eventuais campos gerados pelos instrumentos (sensores ou atuadores) utilizados no experimento. Em virtude deste aspecto, de vital importância em aplicações espaciais, define-se que o controle da corrente das bobinas deverá ser efetuado sem realimentação do campo. Há, então, duas possibilidades para este ajuste:

- ajuste da corrente em malha aberta, mediante processo de calibração prévia, baseado em medidas efetuadas por um instrumento de medição do campo (magnetômetro) na região central das bobinas
- ajuste da corrente parcialmente em malha fechada, com base na corrente medida num resistor padrão em série com a bobina, e uma calibração prévia da corrente em função do campo medido pelo instrumento.

Qualquer que seja a forma de atuação dever-se-á ter uma eletrônica dedicada para efetuar o controle da corrente. As principais características que esta eletrônica deverá possuir são:

- a) Controle digital micro-processado.
- b) Interface de comunicação serial (RS232 ou USB) para comunicação com um computador.
- c) Ajuste da corrente com base em comandos enviados pelo computador conectado à eletrônica.
- d) Resolução de 12 bits (aproximadamente 0,05% ou 1,2 mG).
- e) Estabilidade de 0,1% do valor máximo em operação DC.
- f) Gerar correntes em ambos os sentidos das bobinas.
- g) Suportar correntes de até 4 A.

5. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho um projeto eletro-mecânico de um conjunto de bobinas de Helmholtz de 3 eixos para equipar o Laboratório de Simulação da Divisão de Mecânica Espacial e Controle do INPE. Apresentou-se o equacionamento básico, que permitiu determinar as dimensões das bobinas com base nos requisitos de uniformidade do campo gerado num volume ao redor do centro geométrico do arranjo. O projeto baseou-se no requisito de se conseguir uma uniformidade do campo magnético melhor do que 1% num volume cúbico de 200 mm de aresta na região central do conjunto. Os carretéis foram produzidos no INPE, a partir de um perfil de alumínio em U, e com dimensões que permitem que os carretéis de um eixo sejam inseridos nos carretéis de outro eixo, como pode ser observado na foto mostrada na Fig. (7).

O conjunto de bobinas deverá ser utilizado na simulação de sistemas de controle de atitude de satélites artificiais. Numa simulação com equipamentos na malha de controle deve-se procurar reproduzir o ambiente espacial de forma a garantir um realismo adequado. Quando o controle utiliza magnetômetros e, eventualmente, também bobinas de torque (Wertz, 1978), necessita-se mover os sensores para simular o movimento do satélite. Para isto requer-se sistemas complexos como mesas de mancal aerostático com baixo torque de atrito ou mesas servo-controladas. O conjunto de bobinas de Helmholtz permite, por outro lado, mover o campo magnético ao redor do sensor com movimento baseado na dinâmica do satélite. Outra aplicação seria a calibração e alinhamento de magnetômetros.

Os próximos passos na direção da conclusão do projeto consistem em se medir o campo e calibrar a bobina em função da corrente em cada par de enrolamentos, usando uma fonte convencional de boa estabilidade. Trabalha-se com a possibilidade de se comprar uma fonte controlada de corrente, comercial, que atenda os requisitos apontados na Seção 4, ou então de se projetar e construir uma fonte controlada com realimentação da corrente.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho, bem como os recursos para a aquisição do material das bobinas, foi suportado pelo projeto “Sistemas Inerciais Avançados” – SIA, convênio Finep-INPE-CTA.

7. REFERÊNCIAS

- Asuni, N. “Inductance Calculation: Square Loop”. TECHNICK.NET. http://www.technick.net/public/code/cp_dpape.php?aiocp_dp=util_inductance_square Acesso em 2009.
- Carrara, V.; Varotto, S. E. C. “Projeto de bobinas magnéticas para uso em satélites”. The 2nd Brazilian Conference on Electromagnetics – CBMAG’96, Ouro Preto, MG. 1996. Disponível em: http://www2.dem.inpe.br/val/publicacoes/carrara_projeto_cbmag_96.pdf.
- Charitat, T.; Graner, F. “About the magnetic field of a finite wire”. European Journal of Physics, 24, p. 267-270, 2003. Laboratorio Elettrofisico. “Laboratorio Elettrofisico Walker LDJ Scientific” <http://www.laboratorio.elettrofisico.com/>. Acesso em 2008.

- MEDA (Macintyre Electronic Design Associates), “Precision Magnetometers and Magnetic Field Sources”. <http://www.meda.com/>. Acesso em 2008.
- MEDA (Macintyre Electronic Design Associates). “Compensation of Earth’s Field with a Three-axis Helmholtz Coil”. Application Note AN-108. MEDA, 1999. Disponível em: <http://www.meda.com/Application%20Notes/an108.pdf>.
- NASA “Electromagnetic Test Engineering, Code 549, Goddard Space Flight Center, EMC/EMI Facilities”. <http://mscweb.gsfc.nasa.gov/549web/5493web/facilities.htm>. Acesso em 2009.
- Park, P. G.; Kim, Y. G.; Shifrin, V. Ya.; Khorev, V. N. “Precise standard system for low DC magnetic field reproduction”. Review of Scientific Instruments, Volume 73, Number 8, Aug. 2002. Disponível em: <http://scitation.aip.org/>
- Shirai T. A “Magnetic Field Generator with Active Compensation of External Fields”. Measurement Science and Technology. Vol 15, pg. 248–253, 2004. Disponível em: <http://stacks.iop.org/MST/15/248>.
- Spencer, J.D.; Davis, R.H. “Helmholtz coils for MIL-STD-462D RS101 testing”. 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Volume 2, 2-6. p. 940-942 Aug. 1999.
- Thompson, M. T. “Inductance Calculation Techniques – Part II: Approximations and Handbook Methods”. Power Control and Intelligent Motion, December 1999. Disponível em: http://www.classictesla.com/download/indu_pt_2.pdf.
- Wertz, J. R. “Spacecraft attitude determination and control”, D. Reidel, London, 1978. (Astrophysics and Space Science Library).



Figura 7. Montagem final do conjunto de bobinas de Helmholtz.

8. DIREITOS AUTORAIS

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

A 3-AXIS HELMOLTZ COILS DESIGN FOR GEOMAGNETIC FIELD SIMULATION

Valdemir Carrara, val@dem.inpe.br¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, 12227-010

Abstract. This work presents a mechanical and electrical design of a 3-axis Helmholtz coil set, to simulate the geomagnetic field in low Earth orbit conditions. The Helmholtz set shall integrate the Simulation Laboratory of the Space Mechanics and Control Division of INPE, to generate controlled magnetic strength in order to help in sensor calibration, magnetic sensor and actuator (coils) test, and to simulate the geomagnetic field during tests for onboard attitude control software and algorithm validation. A 3-axis Helmholtz set is largely employed whenever a magnetic field with controlled magnitude and direction is required, as sensor calibration, manufacturing and test of magnetic instruments, and demagnetizing systems. In space applications, a 3-axis set can also simulate the motion of a satellite with respect to the Earth's magnetic field. This work describes the complete design of a system composed by 3 pairs of a squared-shape Helmholtz coils with one-meter side, which generates a 1200 mG maximum strength magnetic field in its center in 3 orthogonal directions. It is presented the theoretical approach that allows computing the magnetic field in any point in the interior volume of the coils, as well as the field deviation in the cube center. The separation between two coils of a single axes was adopted such as to assure a uniform field in the volume center. The design also requires that the coils shall have two windings, assuring that the windings can operate in serial (for 2400 mG maximum field) or parallel (to half the required 3Amp electric current). The current shall be controlled by a high precision and programmable electronic supply, in order to reach the required 1 mG resolution of the magnetic output field.

Keywords: Helmholtz coil, geomagnetic field, magnetic coil.

The author is the only responsible for the printed material included in this paper.

1. RESPONSIBILITY NOTICE