

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5665-NTC-319

PROJETO DE BOBINAS MAGNÉTICAS PARA USO EM SATÉLITES

**Valdemir Carrara
Sebastião Eduardo Corsato Varotto**

**INPE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
1995**

Resumo

Este trabalho apresenta um roteiro de cálculo e projeto para desenvolvimento de bobinas magnéticas para uso em satélites. São apresentadas formulações para bobinas com núcleo de ar e bobinas com núcleo de material ferromagnético. O equacionamento visa obter um projeto otimizado, levando a uma solução de redução do consumo de energia e com massa reduzida. Foram desenvolvidos programas em Basic (listados em anexo) para auxílio ao projeto preliminar de bobinas com ou sem núcleo. Estes programas foram utilizados em dois exemplos: a bobina de controle de velocidades do SCD2 (confirmando os valores efetivamente utilizados no projeto desta bobina) e numa bobina de 10 Am^2 com núcleo de material ferromagnético. O projeto do núcleo também é apresentado neste trabalho.

Abstract

This paper presents a guide to calculate and design magnetic torque coils for use in satellites. Two formulations are shown: for air core magnetic coils and for ferromagnetic cored coils. The equations lead to an optimized design concerning the power (energy consumption) and mass of the coils. In order to validate the design approach, two Basic computer programs (presented in annex) were developed, for air and cored coils. The programs were applied to the SCD2 angular velocity control magnetic coil and in a 10 Am^2 coil with ferromagnetic core. The results confirmed the previous design of the SCD2's coils. The equations used to calculate the core are also addressed in this work.

Sumário

	<u>Pag.</u>
Lista de figuras	<i>ix</i>
Lista de tabelas	<i>ix</i>
Lista de símbolos	<i>xi</i>
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - BOBINAS COM NÚCLEO DE AR	3
2.1 - Cálculo de bobinas com núcleo de ar	3
2.2 - Exemplo de cálculo de uma bobina com núcleo de ar	8
2.3 - Resistividade do fio	9
2.4 - Temperatura de operação	10
2.5 - Tensão de operação	11
3 - BOBINAS COM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO	11
3.1 - Cálculo do núcleo	12
3.2 - Cálculo do solenóide	18
3.3 - Exemplo de cálculo de uma bobina com núcleo	22
4 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
APÊNDICE A - Listagem do programa em Basic	
para projeto de bobina de núcleo de ar	26
APÊNDICE B - Listagem do programa em Basic	
para projeto de bobina de núcleo	30

Lista de figuras

1 - Corte de uma bobina com núcleo ferromagnético	2
2 - Dimensões do solenóide	7
3 - Curva de magnetização de um material ferromagnético	14
4 - Diâmetro do núcleo para material Magperm IPT 49	16

Lista de tabelas

1 - Diâmetros, pesos e correntes nominais de fios	5
2 - Valores de projeto da bobina de 4 Am^2	9
3 - Dimensões do núcleo em função de M	17
4 - Valores de projeto da bobina de 10 Am^2	24

Lista de símbolos

A	Área do interior do solenóide (m^2)
B	Densidade de fluxo magnético (T)
B_{max}	Máxima densidade de fluxo no núcleo (T)
B_r	Magnetização residual ou remanência do núcleo (T)
B_T	Campo magnético da Terra no local da bobina (T)
D	Diâmetro do núcleo (m)
d_{ext}	Diâmetro externo do solenóide (m)
d_{fio}	Diâmetro do fio sem camada isolante (m)
d_{int}	Diâmetro interno do solenóide ou diâmetro do carretel (m)
d_{iso}	Diâmetro do fio incluindo a camada isolante (m)
d_{sol}	Diâmetro médio do solenóide (m)
H	Campo magnético (A/m)
H_e	Força coercitiva (A/m)
i	Corrente elétrica (A)
K	Constante de resistividade (Ωm)
l_{fio}	Comprimento do fio (m)
l_{sol}	Comprimento do solenóide (m)
M	Momento magnético da bobina (Am^2)
n	Número de espiras do solenóide
n_{cam}	Número de camadas do enrolamento
N	Torque magnético gerado pela bobina (Nm)
P	Potência (consumo de energia) (VA)
p_{er}	Perímetro do solenóide (m)
P_{max}	Potência máxima admitida para a bobina (VA)
r	Relação entre o comprimento do núcleo e seu diâmetro
R	Resistência elétrica (Ω)
R_s	Fator de redução do núcleo

T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
U	Tensão de alimentação (V)
V	Volume do núcleo (m^3)
α	Fator térmico de correção da resistência ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
η	Densidade linear do fio (kg/m)
μ	Permeabilidade magnética (N/A^2)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo (N/A^2)
μ_{ap}	Permeabilidade magnética aparente relativa
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
ν	Fluxo de corrente (A/m^2)
ρ	Resistividade do fio (Ω/m)

1. - INTRODUÇÃO

Os satélites de coleta de dados (SCD1 e SCD2) controlam a sua atitude por meio de bobinas magnéticas que interagem com o campo magnético terrestre quando são submetidas a um potencial elétrico, gerando assim um torque. No satélite SCD1, foi fixado uma bobina circular com seu eixo de simetria alinhado ao eixo de rotação do satélite, e desta forma o torque gerado provoca uma precessão no eixo de rotação. Isto permite a realização de manobras de redirecionamento da orientação do satélite com relação ao Sol. Esta bobina possui um diâmetro de 0,6 m aproximadamente e gera um momento magnético de 6 Am^2 , quando submetida a uma tensão nominal de 15 V. Por sua vez, para controlar a atitude o SCD2 conta também com uma bobina de eixo, similar à do SCD1, porém com dois enrolamentos paralelos, gerando assim 12 Am^2 . O SCD2 possui ainda duas bobinas menores, de 4 Am^2 cada, com eixos alinhados perpendicularmente entre si e perpendiculares ao eixo de rotação do satélite (bobinas de plano). Elas serão comandadas por uma eletrônica de bordo que irá selecionar o chaveamento de forma a aumentar ou reduzir a velocidade angular do satélite. Esta eletrônica usa o sinal do magnetômetro, e aciona uma das duas bobinas (a outra só será utilizada em caso de falha da primeira). Todas estas bobinas não possuem núcleo ferromagnético e por isso são denominadas de bobinas com núcleo de ar. Elas foram projetadas, fabricadas, montadas, testadas e qualificadas no INPE.

A segunda geração de satélites brasileiros (SCD3 e sensoriamento 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, em número de três, fornecerão torques para controle durante toda a fase de operação normal do satélite. Estas bobinas deverão gerar torques mais elevados, e portanto o momento magnético delas deverá ultrapassar 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 desenvolver tecnologia de projeto e fabricação de bobinas de núcleo, por diversas vezes interrompido durante os últimos anos. Embora já se disponha de tecnologia de fabricação do núcleo - uma liga de ferro e níquel - conforme o relatório do IPT (Landgraf, 1989), ainda não se produziu uma bobina que fosse submetida aos testes necessários de qualificação. 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.

Com a intenção de contribuir com um roteiro para o projeto, cálculo e dimensionamento das bobinas de núcleo ferromagnético a serem desenvolvidas no INPE, gerou-se este trabalho. As principais relações físicas que descrevem a interação magnética são descritas aqui, bem como as listagens de programas em Basic para cálculo do solenóide. Neste trabalho será adotada a seguinte nomenclatura: o enrolamento de fio de cobre denomina-se *solenóide* ou enrolamento; este é enrolado sobre um *carretel* de material amagnético; e no seu interior pode ou não ser inserido um *núcleo* de material ferromagnético. O conjunto denomina-se *bobina*, conforme ilustrado na Figura 1.

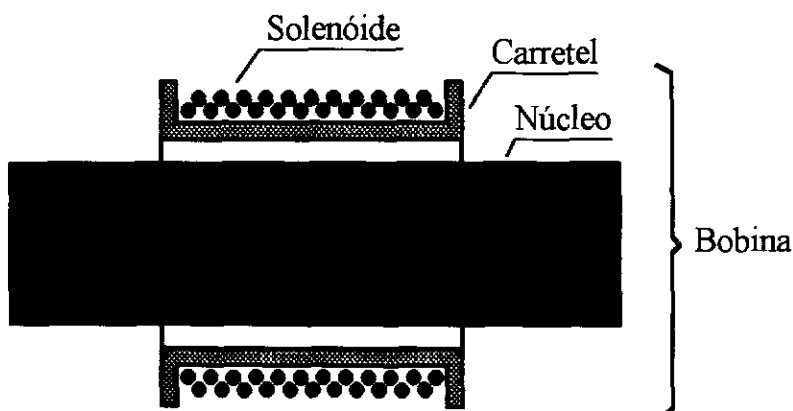


Fig. 1 - Corte de uma bobina com núcleo ferromagnético.

As Seções 2 e 3 estabelecem o equacionamento para projeto de bobinas com núcleo de ar e com núcleo de material ferromagnético, respectivamente. A Seção 4 irá apresentar as conclusões do trabalho.

2. - BOBINAS COM NÚCLEO DE AR

Bobinas com núcleo de ar, ou bobinas sem núcleo, são aquelas que não dispõem de material ferromagnético para amplificar o campo magnético gerado no interior do solenóide. Normalmente se empregam bobinas com seção circular em satélites. Às vezes, entretanto, os requisitos de área disponível para a montagem e o momento magnético exigido para a bobina levam o projeto para a seleção de bobinas com seção retangular. Deve-se ter em conta, neste caso, que bobinas retangulares necessitam de cantos arredondados de forma a evitar raios de curvatura reduzidos no fio. Outro problema deste tipo de bobina é que o enrolamento fica pouco tensionado na parte retilínea do carretel, o que pode causar falhas no processo de cementação do fio.

O projeto de uma bobina pode ser otimizado do ponto de vista da massa ou da potência elétrica consumida. A massa de uma bobina com núcleo de ar é composta basicamente da massa do solenóide e a massa do carretel, este último normalmente feito de alumínio. Quando posta em função do diâmetro da bobina, a massa do solenóide resulta inversamente proporcional ao diâmetro, ou seja, quanto maior a bobina, menor a massa do solenóide. Por sua vez, a massa do carretel é aproximadamente proporcional a este diâmetro. Existe portanto um compromisso, que dependerá das características do projeto do carretel, método de fixação, etc. Pode-se dizer, no entanto, que a massa do solenóide possui parcela significativa da massa total da bobina, de sorte que do ponto de vista de otimização da massa deve-se procurar aumentar o máximo possível o diâmetro da bobina. A otimização da bobina do ponto de vista do consumo energético será visto na Seção 2.1.

2.1 - Cálculo de bobinas com núcleo de ar

O acionamento de bobinas de torque é realizado normalmente na forma de chaveamentos liga-desliga com eventuais inversões de polaridade. Emprega-se pulsos de baixa frequência neste chaveamento, e, com isso, pode-se garantir que a bobina opera na

maior parte do tempo em regime permanente. Isto quer dizer que os efeitos provocados pela indutância na impedância total da bobina são desprezíveis, e a impedância é praticamente formada pela resistência do fio. Considerando que a tensão de alimentação U é fixada preliminarmente, a potência P e a resistência elétrica R serão dados respectivamente por:

$$P = U i \quad (1)$$

e

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U^2}{P}. \quad (2)$$

O diâmetro do fio de cobre a ser utilizado no enrolamento é função da corrente de operação. Entretanto, encontra-se no mercado fios disponíveis em bitolas com diâmetros padronizados. Neste caso, deve-se selecionar o fio que suporta corrente nominal imediatamente superior à corrente de operação. A Tabela 1, obtida do catálogo de fios com película cementável da Pirelli (Pirelli, 1985), mostra os fios de seção circular comumente encontrados e a corrente nominal de cada bitola. Encontram-se nesta tabela valores do diâmetro nominal do fio nú (sem película isolante) d_{fio} , do diâmetro do fio incluindo a isolação d_{iso} , da densidade linear de massa η_{fio} , e da corrente nominal I_{nom} .

Admitindo, conforme a Tabela 1, que a corrente nominal é proporcional ao quadrado do diâmetro do fio, segue que:

$$d_{fio} = \sqrt{\frac{i}{v}}. \quad (3)$$

onde o fluxo de corrente v para fio de cobre vale:

$$v = 2,3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2. \quad (4)$$

TABELA 1
Diâmetros, pesos e correntes nominais de fios

Fio AWG	d_{fio} (mm)	d_{iso} (mm)	η_{fio} (g/m)	i_{nom} (A)
40	0,079	0,112	0,04805	0,015
39	0,089	0,127	0,06051	0,019
38	0,102	0,142	0,07928	0,023
37	0,114	0,158	0,1003	0,028
36	0,127	0,175	0,1235	0,039
35	0,142	0,193	0,1539	0,046
34	0,160	0,213	0,1941	0,060
33	0,180	0,241	0,2455	0,076
32	0,203	0,267	0,3103	0,094
31	0,226	0,292	0,3826	0,124
30	0,254	0,325	0,4770	0,147
29	0,287	0,361	0,6102	0,196
28	0,320	0,396	0,7522	0,242
27	0,361	0,439	0,9525	0,306
26	0,404	0,490	1,198	0,378
25	0,455	0,544	1,514	0,427

Fonte: Pirelli, 1985; Ibrape, s. d.

Deve-se selecionar o fio da Tabela 1 cujo diâmetro seja maior ou igual ao fornecido pela relação acima. A resistividade é inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro do fio, e portanto:

$$\rho = \frac{K}{d_{fio}^2}. \quad (5)$$

onde a constante de proporcionalidade vale, para fios de cobre:

$$K = 2,195 \cdot 10^{-8} \, \Omega\text{m}. \quad (6)$$

Por sua vez, o comprimento do fio será dado pela razão entre a resistência R e a resistividade:

$$l_{\text{fio}} = \frac{R}{\rho} . \quad (7)$$

O comprimento do fio pode ser colocado em termos do produto do número de espiras n e o perímetro médio da seção transversal da bobina p_{er} (ou o comprimento médio de cada espira):

$$l_{\text{fio}} = n p_{er} . \quad (8)$$

O momento magnético M de uma bobina com núcleo de ar depende do número de espiras n , da corrente i e da área da seção transversal A do solenóide (Wertz, 1978):

$$M = A n i . \quad (9)$$

Eliminando o comprimento do fio (l_{fio}), a resistividade (ρ), o diâmetro do fio (d_{fio}), a resistência R , o número de espiras n e a corrente i das Equações 1 a 9, e isolando a potência da bobina, chega-se a:

$$P = \frac{P_{er}}{A} \sqrt{K M} . \quad (10)$$

Como o perímetro cresce linearmente com a dimensão da bobina e a área cresce com o quadrado da dimensão, conclui-se que a potência é inversamente proporcional ao tamanho do solenóide. Portanto, o enrolamento deve ter a maior área possível para que o consumo seja mínimo. A geometria da bobina deve ser fixada antecipadamente e de forma a ter o maior tamanho possível de ser acomodado no satélite. Uma vez definida a relação perímetro sobre área, e desde que seja dado o momento magnético de projeto, a Relação 10 definirá a potência e em consequência

todos os outros parâmetros da bobina. Será necessário, porém, realizar uma iteração, já que a potência depende do diâmetro médio do solenóide e este, por sua vez, só será conhecido após a definição do número de camadas do enrolamento, n_{cam} , dado por:

$$n_{cam} = \frac{d_{iso}}{l_{sol}} n. \quad (11)$$

onde l_{sol} é o comprimento do solenóide, conforme indicado na Figura 2. Note que esta equação é geométrica, e portando deve ser usado o diâmetro do fio com camada isolante, e não o diâmetro do fio nú.

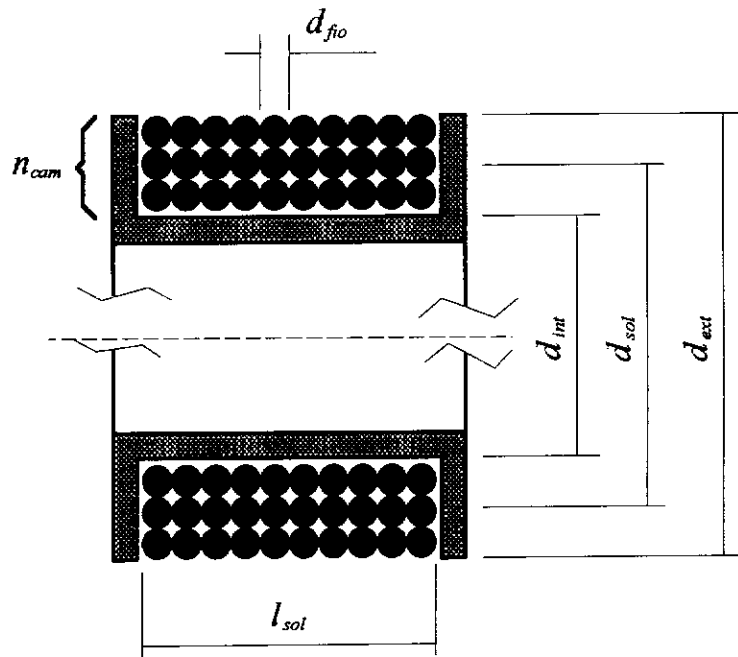


Fig. 2 - Dimensões do solenóide

O diâmetro médio do solenóide, d_{sol} , pode agora ser calculado através da relação:

$$d_{sol} = d_{int} + [1 + 0,87(n_{cam} - 1)] d_{iso} \quad (12)$$

onde d_{int} é o diâmetro interno do solenóide (ou o diâmetro do carretel) conforme a Figura 2. O fator de redução 0,87 (na verdade $\cos 30^\circ$) foi introduzido para levar em conta a acomodação das camadas superiores sobre as inferiores.

Se a bobina tiver seção circular, então a potência resulta em:

$$P = \frac{4}{d_{sol}} \nu KM \quad (13)$$

onde d_{sol} é o diâmetro médio do solenóide.

Nas bobinas com núcleo de ar, procura-se maximizar a área no interior do solenóide, para com isso aumentar a disponibilidade de momento magnético, reduzir a massa do solenóide e diminuir o consumo. O tamanho máximo da bobina, portanto, fica limitado pelo espaço disponível para o equipamento no interior do satélite, ou mesmo por imposições na forma de fixação da bobina na estrutura.

2.2 - Exemplo de cálculo de uma bobina com núcleo de ar

As equações para cálculo de uma bobina com núcleo de ar foram transpostas para um programa em Basic, listado no Apêndice A. As primeiras linhas do programa definem os valores de entrada: o momento magnético projetado M , a tensão de operação U , o diâmetro interno do solenóide (ou diâmetro do carretel) D_{int} e o comprimento do solenóide, L_{sol} conforme a Figura 2. Este programa foi utilizado para refazer o cálculo das bobinas de plano (ou de velocidade) do satélite SCD2. Estas bobinas são fixadas nos painéis laterais do satélite, em virtude da orientação necessária do eixo da bobina. Contudo, o espaço disponível em cada painel é limitado e o diâmetro máximo é da ordem de 200 mm. O carretel é circular (maior relação área sobre perímetro), e o sulco para a acomodação do solenóide possui diâmetro de 174 mm, e comprimento de 10,7 mm. O momento magnético de projeto é de 4 Am^2 e tensão de operação é

igual a 15 V. Os valores calculados pelo programa estão listados na Tabela 2, e correspondem, aproximadamente, aos valores efetivamente usados nas bobinas do SCD2.

TABELA 2
Valores de projeto da bobina de 4 Am²

Parâmetro	Variável	Valor
Diâmetro do carretel	d_{int}	174 mm
Comprimento do solenóide	l_{sol}	10,7 mm
Tensão de alimentação	U	15 V
Consumo da bobina	P	4,4 W
Corrente elétrica	i	0,296 A
Resistência	R	51 Ω
Bitola do fio	AWG	27
Diâmetro do fio	d_{fio}	0,361 mm
Resistividade	ρ	0,168 V/Am
Comprimento do fio	l_{fio}	301 m
Número de espiras	n	526
Número de camadas	n_{cam}	22
Diâmetro do solenóide	d_{sol}	182,3 mm
Momento magnético	M	4,06 Am ²

Uma vez concluído o projeto da bobina, resta ainda verificar se os números obtidos não ultrapassam valores impostos ao projeto devido a outros requisitos. Deve ser levado em conta, por exemplo, que os valores calculados podem variar em função de características construtivas e ambientais. Os cálculos devem refletir os aspectos relacionados nas seções seguintes.

2.3 - Resistividade do fio

A resistividade do fio depende de características construtivas, podendo variar de 2 a 8 % em função do diâmetro do fio (Pirelli, 1985). O valor máximo da corrente de operação deve ser recalculado levando-se em conta os valores apontados no citado

catálogo de fios. Uma vez que a corrente de operação é diferente da corrente calculada, é natural que também o momento magnético também seja diferente. Deve-se adotar valores de tal forma que o momento magnético resultante na pior situação seja igual ou superior ao valor de projeto.

2.4 - Temperatura de operação

A resistência do solenóide é função da temperatura do fio, conforme a relação (Pirelli, 1985):

$$R(T) = R[1 + \alpha(T - 20)] \quad (14)$$

onde $R(T)$ é a resistência do solenóide à temperatura T (graus Celsius), R a resistência nominal (supostamente medida a 20°C), e α um fator de correção que vale para o cobre:

$$\alpha_{Cu} = 0,00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (15)$$

e para o alumínio:

$$\alpha_{Al} = 0,00407 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (16)$$

À temperatura mínima de operação no ambiente espacial (-20°C), a resistência aumenta, conforme a fórmula acima, cerca de 16%, e consequentemente o momento magnético gerado pela bobina reduz de 14%.

2.5 - Tensão de operação

O último ponto se refere à tensão de operação, que normalmente é especificada para operar dentro de certos limites (normalmente inferiores a 10%) do valor da tensão nominal. As variações na tensão de alimentação das bobinas acarretam variações proporcionais na corrente e no momento magnético. Estas oscilações devem ser consideradas no dimensionamento do solenóide, de forma a evitar que a corrente de operação ultrapasse em demasia a corrente nominal estabelecida para aquele fio, conforme a Tabela 1.

3. - Bobinas com núcleo ferromagnético

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

$$N = M \times B_T \quad (17)$$

onde B_T é a o campo magnético no qual a bobina de momento magnético M está imersa. Note que tanto M quanto B_T são vetores, e portanto possuem direção específica. No caso da bobina, a direção de M coincide com o eixo de simetria. Veja também que o torque é perpendicular ao momento magnético e ao campo magnético e, portanto, para um dado campo magnético, só é possível gerar torque num plano perpendicular a este campo. Esta restrição limita o emprego de bobinas nos satélites, pois são incapazes de gerar torques em tres eixos. Normalmente utiliza-se o fato que a direção do campo magnético da Terra varia em relação ao corpo do satélite, conforme este se movimenta em sua órbita, para gerar torque em todas as direções (porém não simultaneamente).

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.

3.1 - 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:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (18)$$

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 :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (19)$$

sendo que a permeabilidade relativa é adimensional e a permeabilidade do vácuo vale:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (20)$$

no sistema MKS.

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

(Concílio et al., 1989), 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, conforme Bozorth, 1951 e Concílio, 1989. Por outro lado, o momento magnético de uma barra cilíndrica cujo comprimento é muito maior que o diâmetro submetida a um campo magnético externo H é dado por (Harris, 1978):

$$M = \left(\frac{B}{\mu_0} - H \right) V R_s \quad (21)$$

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 da Relação 18 na Expressão 21, chega-se a:

$$M = \frac{B}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{ap}} \right) V R_s \quad (22)$$

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 da Relação 22, o que resulta:

$$M \cong \frac{B}{\mu_0} V R_s. \quad (23)$$

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, como o indicado na Figura 3.

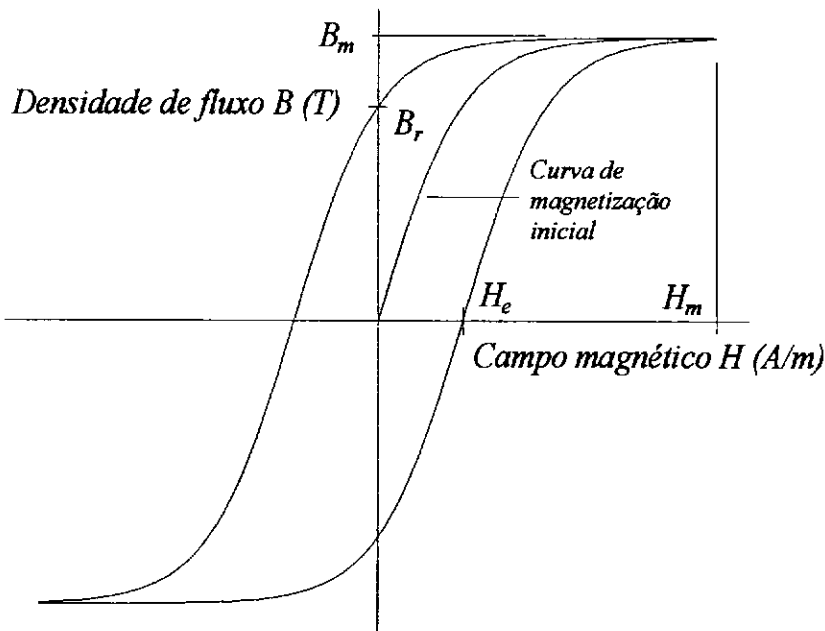


Fig. 3 - Curva de magnetização de um material ferromagnético.

Depois de sofrer uma indução até a saturação, ao se anular o campo magnético o material ainda apresenta uma magnetização residual ou remanência, B_r . Para que esta densidade se anule por completo, deve-se aplicar um campo em sentido contrário à remanência, de valor H_e , conhecido como *força coercitiva*. A remanência é um efeito indesejado nas bobinas utilizadas em satélites, pois provoca um pequeno torque no satélite, mesmo com o solenóide desligado. Além disso, pode também acarretar erros nas leituras do magnetômetro que porventura esteja próximo do núcleo. Para minimizar estes efeitos, procura-se instalar o magnetômetro o mais longe possível da bobina, efetuar medidas somente quando a bobina estiver desligada, e utilizar materiais macios (alto nível de saturação e alta permeabilidade) no núcleo. A densidade de saturação não depende da relação L/D do núcleo, mas apenas do material. No caso da

liga desenvolvida pelo IPT, (Landgraf, 1989) - *Magperm* IPT 49 - este limite está ao redor de 1,5 T. No relatório ESA (Harris, 1978), o limite encontra-se ao redor de 1,0 T.

Conforme mostra a Figura 3, de nada adianta gerar campos magnéticos elevados, pois que o núcleo satura e 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:

$$V = \frac{\pi D^3 r}{4}. \quad (24)$$

Substituindo esta última expressão na Relação 23, e também os valores de μ_0 , B_{max} e R_s , obtém-se para o diâmetro do núcleo:

$$D = 0,012114 \sqrt[3]{\frac{M}{r}}. \quad (25)$$

Esta expressão foi colocada na forma gráfica na Figura 4, para valores de momento magnético entre 1 e 50 Am². Os diâmetros resultantes situam-se entre 4 e 18 mm.

Como foi dito, a permeabilidade aparente depende apenas da geometria ou seja, da relação L/D e não do material. Esta regra é válida para materiais ferromagnéticos com permeabilidade acima de 10000. Como a liga *Magperm* IPT 49 possui permeabilidade de 30000 (Concílio et al., 1989), então a permeabilidade aparente pode

ser aproximada por um polinômio, em função da relação comprimento-diâmetro, com os pontos fornecidos por Bozorth, 1951:

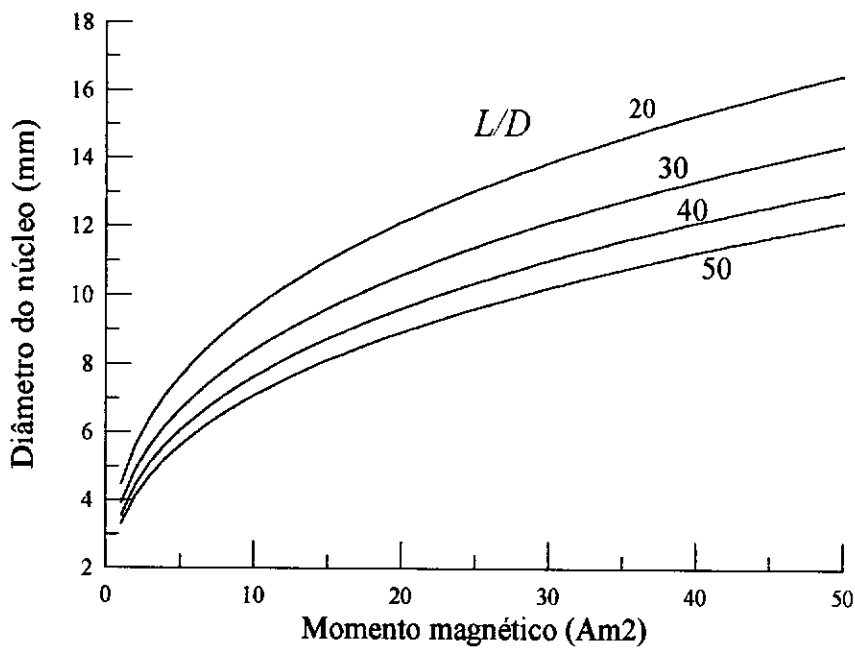


Fig. 4 - Diâmetro do núcleo para material Magperm IPT 49.

$$\mu_{ap} = 0,2083r^2 + 5,750r - 8,333. \tag{26}$$

valida 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.

Para selecionar a melhor relação L/D , deve-se levar em conta que, tendo como pressuposto que o espaço disponível nos satélites para os equipamentos é bastante limitado, deve-se procurar minimizar o comprimento da bobina (e consequentemente do núcleo). Este critério provoca contudo uma diminuição da permeabilidade relativa aparente, (conforme a Relação 26) o que por sua vez irá demandar um campo magnético maior a ser desenvolvido pelo solenóide, para atingir o momento nominal de projeto. Por sua vez, o solenóide irá necessitar um número maior de espiras ou uma corrente elétrica

maior, o que, em ambos os casos, acarreta um aumento no peso do solenóide e no consumo de energia. Existe portanto um compromisso entre o tamanho do núcleo e o consumo da bobina. 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 a Equação 26. Medidas efetuadas pelo IPT (Landgraf, 1989) 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 3 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.

TABELA 3
Dimensões do núcleo em função de M

$M \text{ (Am}^2\text{)}$	$D \text{ (mm)}$	$L \text{ (mm)}$
5	6,7	200
10	8,4	252
15	9,6	288
20	10,6	318

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:

$$H = \frac{B_{max}}{\mu_0 \mu_{ap}}. \quad (27)$$

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

3.2 - 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:

$$H = \frac{n i}{l_{sol}}. \quad (28)$$

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:

$$i = \frac{P_{max}}{U} \quad (29)$$

e

$$R = \frac{U^2}{P_{max}}. \quad (30)$$

O diâmetro do fio deve ser selecionado de forma que a corrente da bobina seja inferior à corrente nominal indicada na Tabela 1 para esta bitola, ou ainda pode-se utilizar a expressão abaixo, que relaciona a corrente do solenóide com o diâmetro do fio:

$$d_{fio} = \sqrt{\frac{i}{v}} \quad (31)$$

com d_{fio} em metros e a corrente i dada em Ampéres. Esta relação foi obtida através de aproximação dos os valores fornecidos pela Tabela 1, que resultou para o fluxo de corrente Φ o valor de $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$. Deve-se ter em conta que fios muito finos podem romper durante o enrolamento, visto que este é realizado manualmente. Por outro lado, fios grossos possuem baixa resistência, e com isso resultam em bobinas grandes e com muitas espiras. Desta forma, recomenda-se que o projeto do solenóide seja encaminhado para uma geometria que leve ao uso de fios com bitolas entre AWG 34 e 28, que possuem diâmetros médios.

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

$$\rho = \frac{K}{d_{\text{fio}}^2}, \quad (32)$$

sendo K uma constante de proporcionalidade, que no caso de fio de cobre vale (Pirelli, 1985):

$$K = 2,195 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}. \quad (33)$$

O comprimento do fio fica automaticamente determinado pois a resistência é fornecida pela Relação 30 e a resistividade é função da bitola escolhida, então:

$$l_{\text{fio}} = \frac{R}{\rho}. \quad (34)$$

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

$$n = \frac{l_{fio}}{\pi d_{sol}}. \quad (35)$$

Finalmente, chega-se ao comprimento do solenóide, obtido a partir da Equação 10:

$$l_{sol} = \frac{n i}{H}, \quad (36)$$

que deve ser compatível com o comprimento do núcleo, isto é, não deve ultrapassar as dimensões deste. Por motivos construtivos, o fio deve ser enrolado no solenóide começando e terminando em uma das extremidades, tendo portanto um número inteiro de camadas:

$$n_{cam} = \text{int} \left(\frac{d_{iso}}{l_{sol}} n \right). \quad (37)$$

No cálculo do número de camadas e do diâmetro médio do solenóide, deve-se considerar o diâmetro do fio com camada isolante, d_{iso} , também listado na Tabela 1, 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:

$$d_{sol} = d_{int} + [1 + 0,87(n_{cam} - 1)] d_{iso} \quad (38)$$

onde d_{int} é o diâmetro interno do solenóide (Figura 2). O fator de redução 0,87 leva em conta a acomodação do fio das camadas superiores sobre as inferiores.

As Expressões 35 a 38 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. Após a iteração das equações acima de forma a incluírem estas restrições, obtêm-se os valores finais do número de camadas n_{cam} (inteiro), diâmetro externo do fio com camada isolante d_{iso} , diâmetro do fio nú d_{fio} , e número de espiras n (inteiro). 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:

$$\bar{n} = n_{cam} \text{ int}(n / n_{cam} + 0,5) \quad (39)$$

$$\bar{d}_{sol} = d_{int} + [1 + 0,87(n_{cam} - 1)] d_{iso} \quad (40)$$

$$\bar{d}_{ext} = d_{int} + 2 [1 + 0,87 (n_{cam} - 1)] d_{iso} \quad (41)$$

$$\bar{l}_{fio} = \pi \bar{n} \bar{d}_{sol} \quad (42)$$

$$\bar{R} = \frac{K}{d_{fio}^2} \bar{l}_{fio} \quad (43)$$

$$\bar{i} = \frac{U}{\bar{R}} \quad (44)$$

$$\bar{P} = U \bar{i} \quad (45)$$

$$\bar{l}_{sol} = \frac{\bar{n}}{n_{cam}} d_{iso} \quad (46)$$

$$\bar{H} = \frac{\bar{n} \bar{i}}{\bar{l}_{sol}} \quad (47)$$

$$\bar{M} = \mu_r \bar{H} V R_s \quad (48)$$

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

3.3 - Exemplo de cálculo de uma bobina com núcleo

As relações obtidas aqui foram introduzidas num programa em Basic, listado no Apêndice B. O programa possui valores de entrada que devem ser fornecidos como constantes no início do programa. Estes valores incluem: o momento magnético de projeto M , a permeabilidade relativa aparente do núcleo μ_r , seu diâmetro D_{nuc} , seu comprimento L_{nuc} e o fator de redução R_s . São também valores de entrada a potência P , a tensão de alimentação U_v e o diâmetro interno do solenóide (ou o diâmetro externo do carretel), D_{int} . Este último pode ser obtido fornecendo-se o espaçamento entre o núcleo e a parte interna do enrolamento, E_{sp} . O programa obtém os valores do fio e do solenóide, de forma a compatibilizar o cálculo com as condições fornecidas. Estas condições precisam ser adequadas de forma a que o fio de cobre não resulte muito fino. Caso o fio selecionado seja AWG 35 ou superior (diâmetro mais fino), o enrolamento do carretel fica comprometido pela fragilidade do fio. Normalmente estes resultados ocorrem quando a tensão de alimentação for muito alta. Caso seja difícil reduzir a tensão de alimentação, pode-se incluir uma resistência elétrica em série com a bobina.

O programa calcula inicialmente o diâmetro do fio, utilizando as Relações 29 a 31 em conjunto com os valores da Tabela 1. Admite em seguida um solenóide com 4 camadas, e obtém o valor do seu diâmetro médio. As Equações 32 a 38 são avaliadas e iteradas, até que o número de camadas se estabilize. A seguir, os valores de projeto (Relações 39 a 48) são calculados e apresentados na saída. Caso sejam enrolados dois solenóides superpostos sobre o mesmo carretel, os valores do segundo solenóide

(externo) são também calculados pelo programa. Como este segundo solenóide deve utilizar o mesmo comprimento de carretel do primeiro, os valores de projeto obtidos pelo programa irão diferir um pouco.

O programa foi usado para obter os resultados de um exemplo, onde foi considerado um núcleo de material Magperm 49, com diâmetro de 8,4 mm e comprimento 252 mm (conforme a Tabela 3). Foi admitido um coeficiente de permeabilidade relativa de $\mu_r = 350$, obtido da Relação 26, 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 4.

Os comentários acerca das variações da corrente elétrica na bobina que foram feitos nas Seções 2.3, 2.4 e 2.5 valem também aqui. Assim, o projeto deve ser analisado de forma a incluir os efeitos provocados pela variação na temperatura de operação, pela diferença no diâmetro médio (e resistividade) do fio no processo de fabricação e pela variação da tensão de operação.

4. - 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 ar e bobinas com núcleo de material ferromagnético. São apresentados dois programas em Basic para dimensionamento de bobinas com núcleo de ar e núcleo ferromagnético. Os programas

foram utilizados na bobina de controle de velocidade angular do satélite SCD2 e numa bobina de núcleo com 10 Am², respectivamente.

TABELA 4
Valores de projeto da bobina de 10 Am²

	Parâmetro	Variável	Valor
Núcleo	Material	Magperm 49	
	Diâmetro	D	8,4 mm
	Comprimento	L	252 mm
	Permeabilidade aparente	μ_{ap}	350
Fio	Material	Cobre	AWG 34
	Diâmetro do fio nú	d_{fio}	0,160 mm
	Diâmetro externo do fio	d_{iso}	0,213 mm
	Comprimento	l_{fio}	117 m
Solenóide	Diâmetro interno	d_{int}	12,4 mm
	Diâmetro médio	d_{sol}	14,6 mm
	Comprimento	l_{sol}	44,9 mm
	Número de camadas	n_{cam}	12
	Número de espiras	n	2532
	Campo gerado	H	2819 A/m
Bobina	Tensão de operação	U	5 V
	Resistência	R	100 Ω
	Corrente de operação	i	0,050 A
	Potência dissipada	P	0,250 W
	Momento magnético	M	10,334 Am ²

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bozorth, R. M. *Ferromagnetism*. New York, Van Nostrand, 1951.

Concilio, 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.

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)

Ibrape *Catálogo de fios*. São Paulo, s. d.

Landgraf, F. J. G. *Parecer técnico 27.403*. São Paulo, IPT, 1989.

Pirelli *Fios para enrolamentos Pirelli*. São Paulo, 1985. Catálogo

APÊNDICE A

Listagem do programa em Basic para projeto de bobina de núcleo de ar

```
REM Parametros da bobina
REM    Momento magnetico esperado (Am2)
M = 4
REM    Tensao de operacao U (V)
U = 15
REM    Diametro interno do solenoide (ou do carretel) Dint
(m)
Dint = .174
REM    Comprimento do solenoide (largura do carretel) Lsol
(m)
Lsol = .0107

REM Constantes:
REM    Pi
pi = 3.141592654#
REM    Constante de proporcionalidade K (Ohm.m)
K = 2.195E-08
REM    Constante de densidade de fluxo (A/m2)
Ni = 2300000!

DIM AWG(20), Dnu(20), Dmax(20)
CLS
FOR i = 1 TO 20: READ dot: AWG(i) = dot: NEXT i
FOR i = 1 TO 20: READ dot: Dnu(i) = dot / 1000: NEXT i
FOR i = 1 TO 20: READ dot: Dmax(i) = dot / 1000: NEXT i

REM Calculo da bobina
REM    Diametro medio do solenoide Dsol (m)
Dsol = Dint

REM    Admitir um numero de camadas ncam
Ncam = 4
icon = 0
n = 10

100 REM Iterar

icon = icon + 1
nold = n

REM    Potencia esperada P (W)
P = 4 * K * Ni * M / Dsol
```

```

REM    Corrente eletrica Ic (A)
Ic = P / U
REM    Resistencia do solenoide R (Ohm)
R = U / Ic
REM    Diametro do fio Dfio (m)
Dfio = SQR(Ic / Ni)
GOSUB 1000
Diso = Dmax(ind)
REM    Resistividade ro (Ohm/m)
ro = K / Dfio / Dfio
REM    Comprimento do fio Lfio (m)
Lfio = R / ro

REM    Admitir o diametro medio do solenoide Dsol (m)
Dsol = Dint + (1 + (Ncam - 1) * .87) * Diso
REM    Numero de espiras n
n = INT(Lfio / pi / Dsol + .5)
REM    Numero de camadas
Ncam = Diso * n / Lsol

IF icon > 30 THEN PRINT "    **** Procedimento de iteracao
nao convergiu ****": END
IF n <> nold THEN GOTO 100

REM Obter os valores finais de projeto
REM    Numero de espiras
n = INT(n + .5)
REM    Comprimento do fio
Lfio = pi * n * Dsol
REM    Resistencia
R = ro * Lfio
REM    Corrente
Ic = U / R
REM    Potencia dissipada
Pu = U * Ic
REM    Area do solenoide
Ar = pi * Dsol * Dsol / 4
REM    Momento magnetico resultante
Mc = Ar * n * Ic
REM    Diametro externo do solenoide Dext (m)
Dext = Dint + 2 * (1 + INT(Ncam - 1) * .87) * Diso

REM Segundo enrolamento
REM    Novo diametro da bobina:
Din2 = Dext

Nca2 = Ncam
n2 = n
icon = 0

```

```

200 REM
icon = icon + 1
nold = n2
REM    Admitir o diametro medio do solenoide Dsol (m)
Dso2 = Din2 + (1 + (Nca2 - 1) * .87) * Diso
REM    Numero de espiras n2
n2 = INT(Lfio / pi / Dso2 + .5)
REM    Numero de camadas
Nca2 = Diso * n2 / Lsol

IF icon > 30 THEN PRINT "    **** Procedimento de iteracao
nao convergiu ****": END
IF n2 <> nold THEN GOTO 200

REM    Numero de espiras
n2 = INT(n2 + .5)
REM    Comprimento do fio
Lfi2 = pi * n2 * Dso2
REM    Resistencia
R2 = ro * Lfi2
REM    Corrente
Ic2 = U / R2
REM    Potencia dissipada
Pu2 = U * Ic2
REM    Area do solenoide
Ar2 = pi * Dso2 * Dso2 / 4
REM    Momento magnetico resultante
Mc2 = Ar2 * n2 * Ic2
REM    Diametro externo do solenoide Dext (m)
Dex2 = Din2 + 2 * (1 + INT(Nca2 - 1) * .87) * Diso

PRINT : PRINT : PRINT
PRINT " Valores de entrada:"
PRINT "    Tensao de operacao (V):          "; U, " Diametro
int. do sol. (mm): "; Dint * 1000
PRINT "    Momento magnetico (Am2):          "; M, "
Comprimento do solen. (mm): "; Lsol * 1000
PRINT
PRINT " Parametros das bobinas:"
PRINT "    Resistividade do fio (Ohm/m)      "; INT(1000 * ro)
/ 1000, " Fio numero AWG:                  "; AWG(ind)
PRINT "    Diametro do fio nu (mm):            "; Dfio * 1000, "
Diametro do fio (mm):          "; Diso * 1000,
PRINT
PRINT " Enrolamentos                          interno:
externo:"
PRINT "    Diametro interno do sol. (mm): "; INT(10000 *
Dint + .5) / 10, , INT(10000 * Din2 + .5) / 10
PRINT "    Diametro externo do sol. (mm): "; INT(10000 *
Dext + .5) / 10, , INT(10000 * Dex2 + .5) / 10

```

```

PRINT "   Diametro medio do solen. (mm): "; INT(10000 *
Dsol + .5) / 10, , INT(10000 * Dso2 + .5) / 10
PRINT "   Comprimento do fio (m):      "; INT(Lfio + .5),
, INT(Lfi2 + .5)
PRINT "   Numero de camadas:           "; INT(Ncam +
.999), , INT(Nca2 + .999)
PRINT "   Numero de espiras:          "; n, , n2
PRINT "   Resistencia (Ohm):           "; INT(R + .5), ,
INT(R2 + .5)
PRINT "   Corrente (mA):                "; INT(1000 * Ic +
.5), , INT(1000 * Ic2 + .5)
PRINT "   Potencia dissipada (W):       "; INT(1000 * Pu +
.5) / 1000, , INT(1000 * Pu2 + .5) / 1000
PRINT "   Momento magnetico (Am2):      "; INT(1000 * Mc +
.5) / 1000, , INT(1000 * Mc2 + .5) / 1000

```

END

```

1000 REM rotina para obter diametro do fio
i = 0
1010 i = i + 1
IF Dfio > Dnu(i) THEN 1010
IF i > 20 THEN PRINT " Erro!": END
Dfio = Dnu(i)
ind = i
RETURN

```

```

DATA 44, 43, 42, 41, 40
DATA 39, 38, 37, 36, 35
DATA 34, 33, 32, 31, 30
DATA 29, 28, 27, 26, 25
DATA 0.051, 0.056, 0.063, 0.071, 0.079
DATA 0.089, 0.102, 0.114, 0.127, 0.142
DATA 0.160, 0.180, 0.203, 0.226, 0.254
DATA 0.287, 0.320, 0.361, 0.404, 0.455
DATA 0.076, 0.084, 0.094, 0.102, 0.112
DATA 0.127, 0.142, 0.158, 0.175, 0.193
DATA 0.213, 0.241, 0.267, 0.292, 0.325
DATA 0.361, 0.396, 0.439, 0.490, 0.544

```

APÊNDICE B

Listagem do programa em Basic para projeto de bobina de núcleo

```
REM Parametros do nucleo:
REM   Diametro do nucleo Dnuc (m)
Dnuc = .0084
REM   Comprimento do nucleo Lnuc (m)
Lnuc = .252
REM   Momento magnetico esperado (Am2)
M = 10
REM   Permeabilidade relativa aparente
Mr = 350
REM   Fator de reducao Rs
Rs = .75
REM   Fluxo magnetico maximo Bmax (T)
Bmax = 1.2

REM Requisitos do solenoide:
REM   Potencia P (W)
P = .25
REM   Tensao de operacao Uv (V)
Uv = 5
REM   Espacamento entre o nucleo e o diametro interno do
solenoides Esp (m)
Esp = .002
REM   Diametro interno do solenoide (ou do carretel) Dint
(m)
Dint = Dnuc + 2 * Esp

REM Constantes:
REM   Pi
Pi = 3.141592654#
REM   Tensao no solenoide U (V)
U = Uv
REM   Volume do nucleo V (m3)
V = Pi * Dnuc * Dnuc / 4 * Lnuc
REM   Constante de proporcionalidade K (Ohm.m)
K = 2.195E-08

DIM AWG(20), Dnu(20), Dmax(20)
CLS
FOR i = 1 TO 20: READ dot: AWG(i) = dot: NEXT i
FOR i = 1 TO 20: READ dot: Dnu(i) = dot / 1000: NEXT i
FOR i = 1 TO 20: READ dot: Dmax(i) = dot / 1000: NEXT i

REM Calculo da bobina
REM   Indutancia magnetica no nucleo H (Wb/m2)
H = M / Mr / V / Rs
```

```

REM    Corrente no solenoide Ic (A)
Ic = P / U
REM    Resistencia do solenoide R (Ohm)
R = U * U / P
REM    Diametro do fio Dfio (m)
Dfio = SQR(Ic / 2300000)
GOSUB 1000
Diso = Dmax(ind)

REM    Resistividade ro (Ohm/m)
ro = K / Dfio / Dfio
REM    Comprimento do fio Lfio (m)
Lfio = R / ro
REM    Admitir um numero de camadas ncam
Ncam = 4
icon = 0

100 REM  Iterar

icon = icon + 1
Nold = Ncam
REM    Admitir o diametro medio do solenoide Dsol (m)
Dsol = Dint + (1 + (Ncam - 1) * .87) * Diso
REM    Numero de espiras n
n = Lfio / Pi / Dsol
REM    Comprimento do solenoide Lsol (m)
Lsol = n * Ic / H
REM    Numero de camadas
Ncam = INT(Diso * n / Lsol + .5)

IF icon > 30 THEN PRINT "    **** Procedimento de iteracao
nao convergiu ****": END

IF Ncam <> Nold THEN GOTO 100

REM    Obter os valores finais de projeto

n = Ncam * INT(n / Ncam + .5)
REM    Comprimento do fio
Lfio = Pi * n * Dsol
REM    Resistencia
R = ro * Lfio
REM    Corrente
Ic = U / R
REM    Potencia dissipada
Pu = U * Ic
REM    Comprimento do solenoide
Lsol = n / Ncam * Diso
REM    Inducao magnetica
H = n * Ic / Lsol

```

```

REM      Momento magnetico resultante
Mc = H * Mr * V * Rs
REM      Diametro externo do solenoide Dext (m)
Dext = Dint + 2 * (1 + (Ncam - 1) * .87) * Diso

REM Segundo enrolamento
REM      Novo diametro da bobina:
Din2 = Dext

Nca2 = Ncam - 1
Dso2 = Din2 + (1 + (Nca2 - 1) * .87) * Diso
n2 = Lfio / Pi / Dso2
Nca2 = INT(Diso * n2 / Lsol + .5)

n2 = Nca2 * INT(Lsol / Diso)
REM      Diametro medio do solenoide
Dso2 = Din2 + (1 + (Nca2 - 1) * .87) * Diso
REM      Comprimento do fio
Lfi2 = Pi * n2 * Dso2
REM      Resistencia
R2 = Lfi2 * ro
REM      Corrente
Ic2 = U / R2
REM      Potencia dissipada
pu2 = U * Ic2
REM      Inducao magnetica
H2 = n2 * Ic2 / Lsol
REM      Momento magnetico resultante
Mc2 = H2 * Mr * V * Rs
REM      Diametro externo do solenoide
Dex2 = Din2 + 2 * (1 + (Nca2 - 1) * .87) * Diso

PRINT : PRINT : PRINT
PRINT " Valores de entrada:"
PRINT "      Potencia maxima admitida (W): "; P, " Diametro
do nucleo (mm): "; Dnuc * 1000
PRINT "      Tensao de operacao (V): "; U, "
Comprimento do nucleo (mm): "; INT(Lnuc * 10000 + .5) / 10
PRINT "      Momento magnetico (Am2): "; M, "
Permeabilidade aparente: "; Mr
PRINT
PRINT " Parametros das bobinas:"
PRINT "      Resistividade do fio (Ohm/m) "; INT(1000 * ro)
/ 1000, " Diametro do fio nu (mm): "; Dfio * 1000
PRINT "      Comprimento do solenoide (m): "; INT(10000 *
Lsol + .5) / 10, " Diametro do fio (mm): "; Diso *
1000
PRINT "      Diametro do carretel (mm): "; Dint * 1000, "
Fio numero AWG: "; AWG(ind)
PRINT

```

```

PRINT " Enrolamentos                                interno:
externo:"
PRINT "   Diametro interno do sol. (mm): "; INT(10000 *
Dint + .5) / 10, , INT(10000 * Din2 + .5) / 10
PRINT "   Diametro externo do sol. (mm): "; INT(10000 *
Dext + .5) / 10, , INT(10000 * Dex2 + .5) / 10
PRINT "   Comprimento do fio (m):           "; INT(Lfio + .5),
, INT(Lfi2 + .5)
PRINT "   Numero de camadas:                 "; Ncam, , Nca2
PRINT "   Numero de espiras:                 "; n, , n2
PRINT "   Resistencia (Ohm):                 "; INT(R + .5), ,
INT(R2 + .5)
PRINT "   Corrente (mA):                     "; INT(1000 * Ic +
.5), , INT(1000 * Ic2 + .5)
PRINT "   Potencia dissipada (mW):           "; INT(1000 * Pu +
.5), , INT(1000 * pu2 + .5)
PRINT "   Campo magnetico (A/m):             "; INT(H + .5), ,
INT(H2 + .5)
PRINT "   Momento magnetico (Am2):           "; INT(1000 * Mc +
.5) / 1000, INT(1000 * Mc2 + .5) / 1000

```

END

```

1000 REM rotina para obter diametro do fio
i = 0
1010 i = i + 1
IF Dfio > Dnu(i) THEN 1010
IF i > 20 THEN PRINT " Erro!": END
Dfio = Dnu(i)
ind = i
RETURN

```

```

DATA 44, 43, 42, 41, 40
DATA 39, 38, 37, 36, 35
DATA 34, 33, 32, 31, 30
DATA 29, 28, 27, 26, 25
DATA 0.051, 0.056, 0.063, 0.071, 0.079
DATA 0.089, 0.102, 0.114, 0.127, 0.142
DATA 0.160, 0.180, 0.203, 0.226, 0.254
DATA 0.287, 0.320, 0.361, 0.404, 0.455
DATA 0.076, 0.084, 0.094, 0.102, 0.112
DATA 0.127, 0.142, 0.158, 0.175, 0.193
DATA 0.213, 0.241, 0.267, 0.292, 0.325
DATA 0.361, 0.396, 0.439, 0.490, 0.544

```