

INPE-5359-PRP/163

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS DE 13 kG

J.O. Rossi
Y. Aso
P.J. Castro
J.J. Barroso
G.O. Ludwig
A. Montes
M.C.A. Nono
R.A. Correa

Este trabalho consiste num relatório das atividades desenvolvidas durante a construção do sistema de bobinas magnéticas do girotron do LAP. Ele foi apresentado na

42a. Reunião Anual da SBPC, Porto Alegre, RS, 1990.

INPE

São José dos Campos

Agosto de 1991

**Secretaria da Ciência e Tecnologia
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

INPE-5359-PRP/163

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE
BOBINAS MAGNÉTICAS DE 13 KG**

J.O. Rossi
Y. Aso
P.J. Castro
J.J. Barroso
G.O. Ludwig
A. Montes
M.C.A. Nono
R.A. Correa

Este trabalho consiste num relatório das atividades desenvolvidas durante a construção do sistema de bobinas magnéticas do girotron do LAP. Ele foi apresentado na

42a. Reunião Anual da SBPC, Porto Alegre, RS, 1990.

INPE

São José dos Campos

Agosto de 1991

INPE-5359-PRP/163

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS DE 13 kG

J.O. Rossi
Y. Aso
P.J. Castro
J.J. Barroso
G.O. Ludwig
A. Montes
M.C.A. Nono
R.A. Correa

Este trabalho consiste num relatório das atividades desenvolvidas durante a construção do sistema de bobinas magnéticas do girotron do LAP. Ele foi apresentado na 42a. Reunião Anual da SBPC, Porto Alegre, RS, 1990.

INPE

São José dos Campos

Agosto de 1991

CDU: 533.9

Palavras-Chave: Girotron; Bobinas Magnéticas

RESUMO

Neste trabalho, a construção do sistema de bobinas magnéticas de um girotron de 35 GHz é descrita com bastante detalhe. Este sistema é projetado para gerar uma indução magnética de 13,2 kG sobre uma extensão de 13 cm. Usando-se uma corrente de aproximadamente 100 A, é verificado que o perfil axial do campo magnético e a não-uniformidade espacial estão de acordo com aqueles previstos teoricamente.

CONSTRUCTION OF A 13 kG COIL SYSTEM

ABSTRACT

The construction of magnetic coil system for a 35 GHz gyrotron is reported in great detail. This system is designed to generate a magnetic induction of 13,2 kG over an extension of 13 cm. By using an operating current of about 100 A, it was verified that both the axial magnetic field profile and the spatial non-uniformity are in close agreement with those theoretically predicted.

SUMÁRIO

	Pag.
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 CONSTRUÇÃO DA BOBINA MAGNÉTICA	3
CAPÍTULO 3 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS	14
CAPÍTULO 4 MAPEAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO	17
4.1 MEDIÇÃO DO PERFIL AXIAL DE INDUÇÃO MAGNÉTICA	17
4.2 MEDIDA DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO CAMPO MAGNÉTICO	25
CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
APÊNDICE A CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO NO INTERIOR DE UM SOLENÓIDE ESPESSE	31
APÊNDICE B PROGRAMA DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO DO SISTEMA DE SOLENÓIDES	33

LISTA DE FIGURAS

	Pag.	
1.1	Desenho esquemático do girotron.	1
2.1	Seção transversal do fio de cobre; $a = 8,81$ mm; $b = 9,05$ mm; $\phi = 4,93$ mm; $e = 0,12$ mm (camada isolante); $S = 58,23$ mm ² (área ativa).	3
2.2	Corte transversal de uma bobina; $a_1 = 50,0$ mm para a bobina da cavidade; $a_1 = 125,0$ mm para a bobina do canhão ou do coletor; $a_2 = 203,0$ mm para todas as bobinas.	4
2.3	Fotografia das bobinas magnéticas da cavidade sendo submetidas a testes de alta pressão.	5
2.4	Ponte de "Wheatstone" para a medição de resistência R_{20} da bobina da cavidade.	8
2.5	Caso 1: medição da resistência total com contato normal. $M =$ número da medida. * - não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande. $\bar{R}_4 = [R_4(1) + R_4(2) + R_4(4) + R_4(5)]/4 \simeq 49,85$ m Ω	9
2.6	Caso 2: medição da resistência de contato normal. $M =$ número da medida. * não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande.	10
2.7	Caso 3: medição da resistência de contato de conector e de solda. $M =$ número da medida.	11
2.8	Caso 4: medição da resistência total com contato de solda. $M =$ número da medida.	12
2.9	Caso 5: medição da resistência de contato de solda. $M =$ número da medida.	13
3.1	Fotografia do sistema de bobinas magnéticas, incluindo estrutura de suporte e distribuidores de água.	15
3.2	Esquema detalhado do girotron e estrutura de suporte.	16
4.1	Sistema de medição do perfil axial de indução magnética.	18
4.2	Perfil axial de indução magnética do solenóide do canhão.	19
4.3	Perfil axial de indução magnética do solenóide principal.	20
4.4	Perfil axial de indução magnética do solenóide do coletor.	21
4.5	Perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides.	24
4.6	Sistema de medida da variação espacial do campo magnético; $e_1 =$ tensão induzida na bobina de referência (bobina na seção média do magneto); $e_2 =$ tensão induzida na sonda magnética (bobina móvel).	26
4.7	Circuito amplificador e isolador.	27
4.8	Variação espacial do campo magnético principal ao longo do eixo z . Origem $z = 0$ colocada no centro do magneto da cavidade.	28
A.1	Seção de corte de um solenóide espesso.	31

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresenta-se a descrição do sistema de bobinas magnéticas empregado para a produção de um campo magnético de alta intensidade. Este campo magnético servirá para colocar em operação um girotron em 35 GHz, que está sendo desenvolvido pelo Laboratório Associado de Plasma - LAP do INPE.

O girotron é um tubo de microondas baseado na interação entre um feixe de elétrons e o campo eletromagnético numa cavidade ressonante, conforme mostra a Figura 1.1. O feixe eletrônico é produzido quando os elétrons são arrancados da faixa emissora no canhão. Para que isso ocorra, o filamento do girotron deve ser previamente aquecido e o canhão deve operar com tensão de feixe da ordem de -50 kV com uma tensão típica de 1º anodo de -25 kV. O 2º anodo, conectado ao corpo do girotron (tensão de 0V), é responsável pela aceleração do feixe eletrônico. Quando os elétrons chegam à região da cavidade, ocorre uma interação entre eles e um modo eletromagnético normal da cavidade em que parte da energia do feixe é transferida para os campos de radiofrequência. Esta energia transferida provém do movimento ciclotrônico dos elétrons.

Uma importante característica do girotron é que ele requer a aplicação de um campo magnético externo, o qual está especificamente relacionado com a frequência de operação, dada pela condição de ressonância ciclotrônica. Esta relação é dada pela seguinte equação:

$$\omega = n\omega_c, \tag{1.1}$$

onde ω é a frequência de operação (em rad/s), n é o número harmônico e ω_c é a frequência ciclotrônica ou a velocidade angular (em rad/s) dada por:

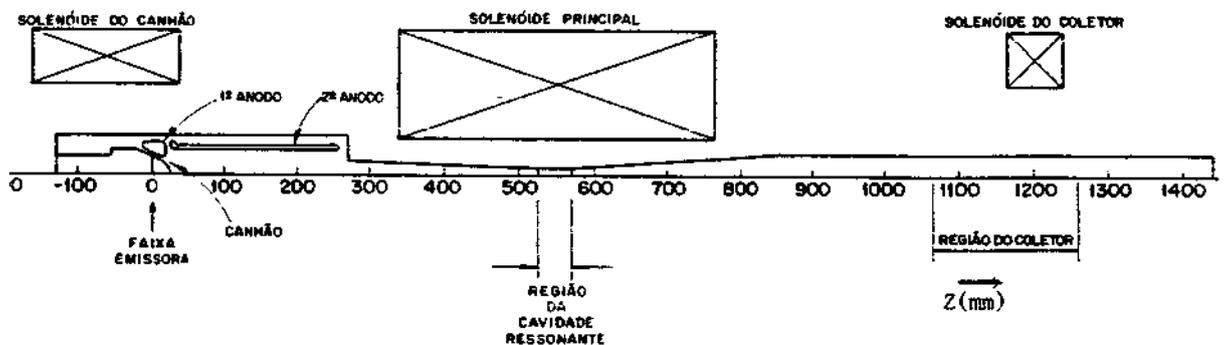


Fig. 1.1 - Desenho esquemático do girotron.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresenta-se a descrição do sistema de bobinas magnéticas empregado para a produção de um campo magnético de alta intensidade. Este campo magnético servirá para colocar em operação um girotron em 35 GHz, que está sendo desenvolvido pelo Laboratório Associado de Plasma - LAP do INPE.

O girotron é um tubo de microondas baseado na interação entre um feixe de elétrons e o campo eletromagnético numa cavidade ressonante, conforme mostra a Figura 1.1. O feixe eletrônico é produzido quando os elétrons são arrancados da faixa emissora no canhão. Para que isso ocorra, o filamento do girotron deve ser previamente aquecido e o canhão deve operar com tensão de feixe da ordem de -50 kV com uma tensão típica de 1º anodo de -25 kV. O 2º anodo, conectado ao corpo do girotron (tensão de $0V$), é responsável pela aceleração do feixe eletrônico. Quando os elétrons chegam à região da cavidade, ocorre uma interação entre eles e um modo eletromagnético normal da cavidade em que parte da energia do feixe é transferida para os campos de radiofrequência. Esta energia transferida provém do movimento ciclotrônico dos elétrons.

Uma importante característica do girotron é que ele requer a aplicação de um campo magnético externo, o qual está especificamente relacionado com a frequência de operação, dada pela condição de ressonância ciclotrônica. Esta relação é dada pela seguinte equação :

$$\omega = n\omega_c, \quad (1.1)$$

onde ω é a frequência de operação (em rad/s), n é o número harmônico e ω_c é a frequência ciclotrônica ou a velocidade angular (em rad/s) dada por:

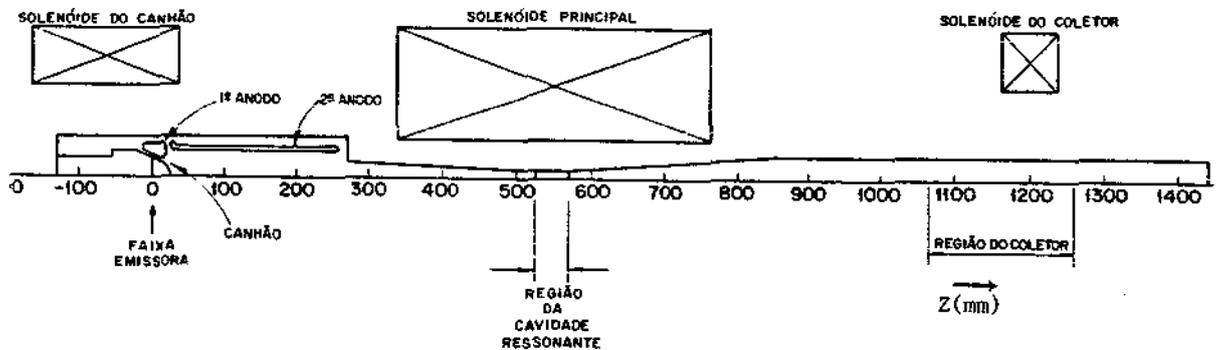


Fig. 1.1 - Desenho esquemático do girotron.

$$w_c = \frac{eB}{\gamma m_o}, \quad (1.2)$$

onde B é o campo magnético (em tesla), e é a carga do elétron (em Coulomb) e γm_o é a massa relativística da elétron (em Kg). Uma interação de alta eficiência ocorre somente quando a relação (1.1) é verificada.

O fator relativístico adimensional γ pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\gamma = 1 + \frac{V_F}{511}, \quad (1.3)$$

onde V_F é a tensão do feixe dada em kV .

Através das relações (1.1), (1.2) e (1.3), pode-se calcular que o campo magnético principal B no centro da cavidade para uma frequência fundamental $f = 35 \text{ GHz}$ ($n = 1$) é da ordem de 13 kG , considerando-se que $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_o = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ e $V_F = 50,0 \text{ kV}$.

Na realidade, um perfil axial de indução magnética com três patamares de $1,05 \text{ kG}$, $13,2 \text{ kG}$ e $0,65 \text{ kG}$, dispostos respectivamente nas regiões do canhão, cavidade e coletor, é requerido para a operação do girotron. O valor do patamar do campo magnético de $13,2 \text{ kG}$ sobre uma extensão maior do que 13 cm na região da cavidade está otimizado em função da eficiência máxima de 40% do girotron. Este patamar é produzido pelo solenóide principal alimentado por uma corrente da ordem de 1 kA . O patamar de indução magnética de $1,05 \text{ kG}$ na região do catodo controla o raio do feixe e a velocidade transversal dos elétrons. Na região do coletor, o patamar de $0,65 \text{ kG}$, produzido por outro solenóide auxiliar, faz com que o raio do centro de guia do feixe de elétrons seja igual ao raio interno do coletor de $3,18 \text{ cm}$. Dessa forma, o feixe sempre tende a ser espalhado no coletor, evitando com isso a colisão dos elétrons em partes sensíveis, como as paredes da cavidade ressonante, por exemplo. Os dois solenóides auxiliares e o principal constituem o sistema de bobinas magnéticas responsável pela produção do perfil axial de indução magnética. Maiores esclarecimentos sobre estes detalhes de projeto e outros podem ser obtidos em Barroso (1).

CAPÍTULO 2

CONSTRUÇÃO DA BOBINA MAGNÉTICA

As bobinas magnéticas consistem em um fio de seção quadrada de $9,0 \times 9,0 \text{ mm}^2$ aproximadamente (ver Figura 2.1) enrolado sob a forma de um espiral em duas faces (cada face é constituída de uma panqueca). O fio de seção quadrada é totalmente vazado por um furo de diâmetro $\phi \simeq 5,0 \text{ mm}$ pelo qual flui água pressurizada para resfriar a massa de cobre. As bobinas são enroladas através de uma bobinadeira, especialmente projetada e construída para esta finalidade.

Há duas espécies de bobinas: a primeira espécie com raio interno $a_1 = 50,0 \text{ mm}$ para compor o solenóide principal (ou da cavidade) e a segunda espécie com raio interno $a_1 = 125,0 \text{ mm}$ para compor os solenóides do canhão e do coletor. Ambas as espécies possuem o mesmo raio externo $a_2 = 203,0 \text{ mm}$. A Figura 2.2 mostra um desenho esquemático do corte transversal de uma bobina. A Figura 2.3 mostra a fotografia das bobinas magnéticas da cavidade dispostas sobre uma bancada comum, onde estão sendo feitos os testes de alta pressão ($p_{max} \simeq 15 \text{ atm}$) com gás (N_2) para os conectores de água de refrigeração tipo “poly-flo”. Os conectores são soldados nas extremidades das bobinas, tomando-se o cuidado de não entupí-los com solda durante o processo de soldagem.

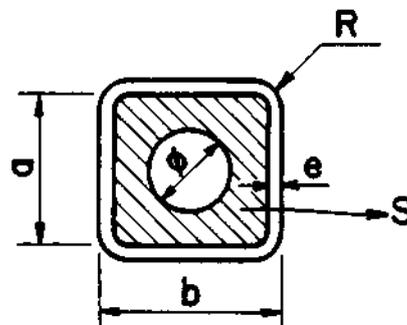


Fig. 2.1 - Seção transversal do fio de cobre; $a = 8,81 \text{ mm}$; $b = 9,05 \text{ mm}$; $\phi = 4,93 \text{ mm}$; $e = 0,12 \text{ mm}$ (camada isolante); $S = 58,23 \text{ mm}^2$ (área ativa).

Como pode ser observado na Figura 2.3, as bobinas são reforçadas por fitas de fibra de vidro embebidas em resina “epoxy” dispostas radialmente na face da bobina e presas na extremidade. Isto é necessário porque apenas a resina “epoxy”, colocada nas bordas do fio de cobre durante o processo de enrolamento, não é capaz de suportar os esforços de expansão quando flui uma corrente de 1 kA .

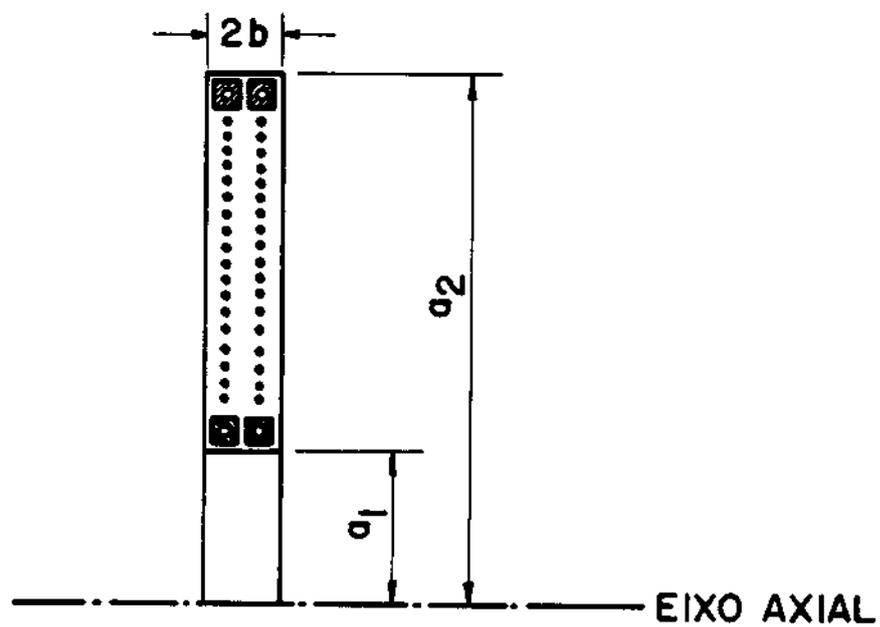


Fig. 2.2 - Corte transversal de uma bobina; $a_1 = 50,0$ mm para a bobina da cavidade; $a_1 = 125,0$ mm para a bobina do canhão ou do coletor; $a_2 = 203,0$ mm para todas as bobinas.



Fig. 2.3 - Fotografia das bobinas magnéticas da cavidade sendo submetidas a testes de alta pressão.

O comprimento do condutor L_t necessário para construir uma bobina pode ser dado pelo número espiras multiplicado pelo comprimento médio da circunferência:

$$L_t = \pi N(a_1 + a_2), \quad (2.1)$$

onde N é o número de espiras de cada bobina.

Calcula-se que L_t é da ordem de 25,0 m para as bobinas da cavidade com $N = 32$, $a_1 = 0,05$ m e $a_2 = 0,203$ m enquanto que $L_t \simeq 16,0$ m para as bobinas do canhão ou coletor com $N = 16$, $a_1 = 0,125$ m e $a_2 = 0,203$ m.

O cálculo de L_t é importante para calcular a resistência de cada bobina e para cortar o fio durante o processo de construção, pois deve-se desenrolar totalmente o comprimento L_t para colocar o fio na bobinadeira. Maiores detalhes sobre construção de bobinas magnéticas podem ser obtidas em Montgomery (2).

O cálculo da resistência R_{20} de cada bobina em função do comprimento L_t na temperatura ambiente ($T = 20^\circ C$) pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$R_{20} = \rho_{20} \frac{L_t}{S} \quad (2.2)$$

onde ρ_{20} é a resistividade do cobre a $20^\circ C$ e S é a área ativa da seção transversal do fio de cobre (ver Figura 2.1). Considerando-se $\rho_{20} = 1,72 \times 10^{-6} \Omega.m$ e $S = 58,23 \times 10^{-6} m^2$, obtém-se que $R_{20} \simeq 7,50 m\Omega$ para a bobina da cavidade e $R_{20} \simeq 5,0 m\Omega$ para a bobina do canhão ou coletor.

Além de estimar a resistência da bobina da cavidade, é necessário também medir o valor desta resistência para confirmar o valor teórico obtido. Isto é de grande importância porque alguns miliohms a mais na resistência de cada bobina requerem mais potência da fonte de alimentação elétrica e do sistema de refrigeração, acarretando um aumento nos custos dos equipamentos. Quanto às bobinas do canhão ou coletor, não houve preocupação com relação a estas medidas, visto que os requisitos de potência para produzir os campos magnéticos nas regiões do canhão e coletor são bem menores.

Para medir a resistência da bobina da cavidade R_{20} na temperatura ambiente ($T = 20^\circ C$), utiliza-se uma ponte de "Wheatstone", conforme mostra a Figura 2.4.

Pode ser demonstrado que na condição de equilíbrio ($I = 0$), vale a seguinte relação :

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (2.3)$$

As medidas são feitas com uma determinada bobina em cinco configurações diferentes denominadas 1, 2, 3, 4 e 5, mostradas nas Figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 respectivamente.

A resistência total R_t é igual à soma da resistência de contato R_c com a resistência da bobina R_{20} , isto é, $R_t = R_c + R_{20}$.

Os casos 1 e 2 fornecem medidas com contatos normais (um fio é enrolado sobre o condutor de cobre com uma certa pressão) e os casos 3 e 5 com contatos a base de solda. No caso de contato normal, o efeito da condição de contato é grande. Porém, considerando-se que $R_t > R_c$, obtém-se que a resistência R_{20} pode ser da ordem de 9,65 m Ω .

Com o objetivo de diminuir o efeito da resistência de contato, os fios que conectam a bobina ao ramo R_4 da ponte são soldados sobre o fio de cobre da bobina. Os resultados do caso 3 são preliminares, em que é introduzido adicionalmente na resistência de contato um condutor de cobre de alta corrente. A partir dos casos 4 e 5, uma resistência da bobina $R_{20} \simeq 7,0$ m Ω pode ser obtida. Nesta medição, deve-se mencionar que a resistência de contato, incluindo a resistência dos condutores que conectam a bobina ao ramo R_4 da ponte, é maior do que a resistência da bobina R_{20} por um fator de 4 aproximadamente.

A partir dos casos 3 e 4, estima-se que a resistência de contato cabo-bobina é da ordem de 1 m Ω .

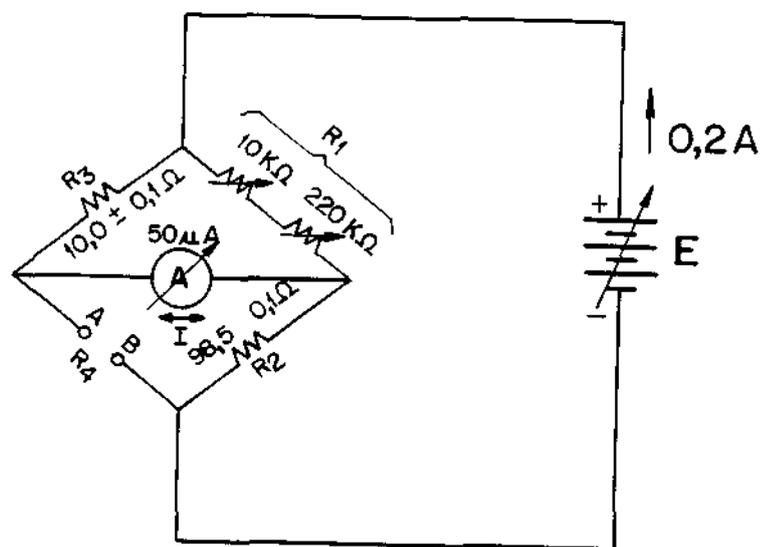


Fig. 2.4 - Ponte de "Wheatstone" para a medição de resistência R_{20} da bobina da cavidade.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	20,50	48,00
2	20,45	48,20
*3	15,60	63,10
4	19,00	51,80
5	19,15	51,40

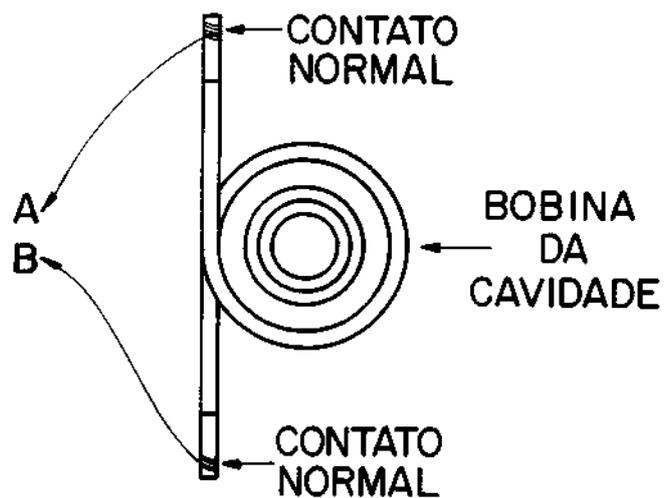


Fig. 2.5 - Caso 1: medição da resistência total com contato normal. M = número da medida. * - não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande. $\bar{R}_4 = [R_4(1) + R_4(2) + R_4(4) + R_4(5)]/4 \simeq 49,85 \text{ m}\Omega$.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	24,50	40,20
*2	18,35	53,70

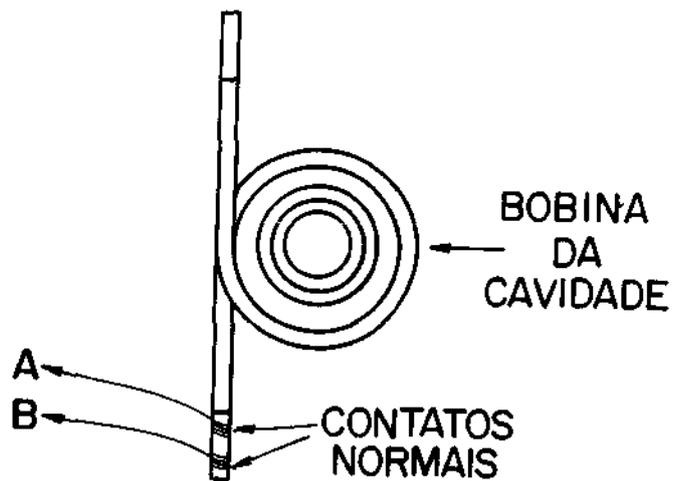


Fig. 2.6 - Caso 2: medição da resistência de contato normal. M = número da medida. * não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	25,45	38,70

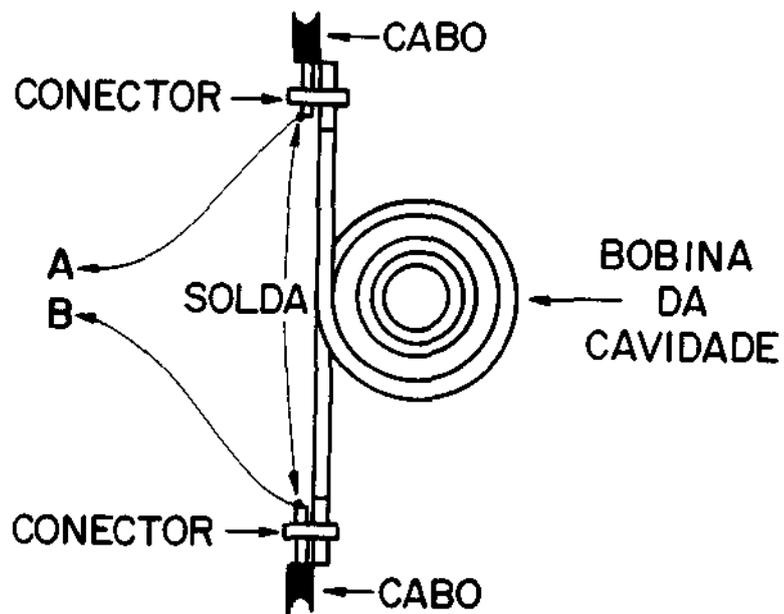


Fig. 2.7 - Caso 3: medição da resistência de contato de conector e de solda.
M = número da medida.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	26,15	37,70

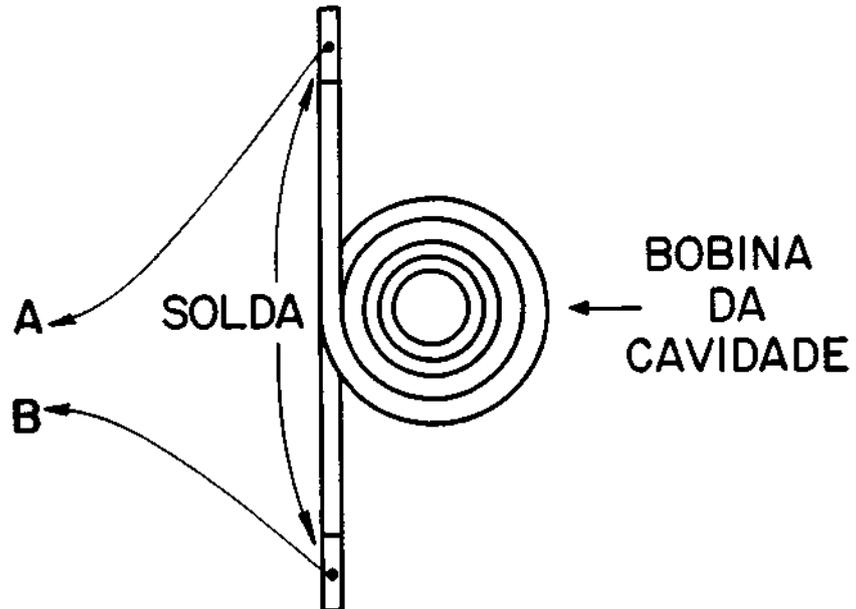


Fig. 2.8 - Caso 4: medição da resistência total com contato de solda.
M = número da medida.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	32,10	30,70

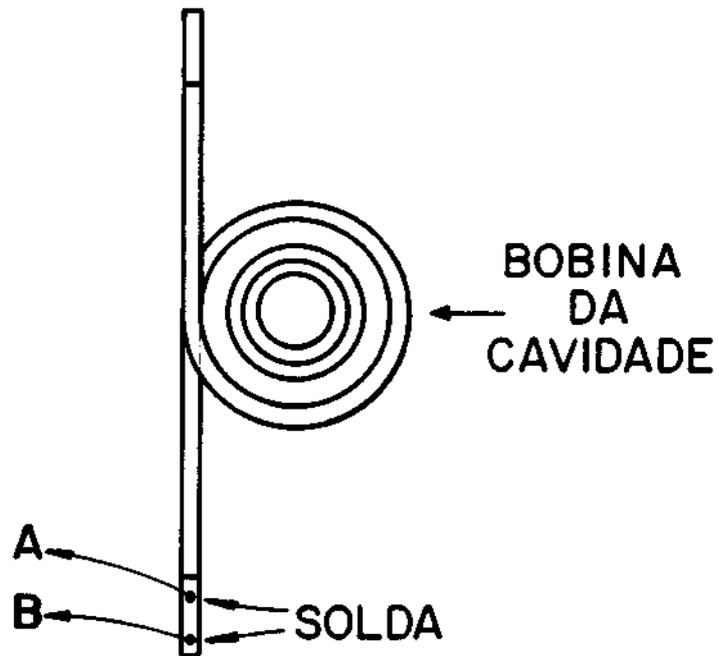


Fig. 2.9 - Caso 5: medição da resistência de contato de solda.
M = número da medida.

CAPÍTULO 3

CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS

A construção do sistema de bobinas magnéticas consiste na montagem do solenóide principal na região da cavidade ressonante e de dois solenóides auxiliares na região do canhão e do coletor, utilizando-se para isso uma estrutura de suporte, conforme mostra a fotografia do sistema na Figura 3.1.

Um esquema detalhado do girotron onde se pode observar o sistema de solenóides, está mostrado na Figura 3.2. Este esquema também inclui o sistema de vácuo e parte do sistema de refrigeração (distribuidores de água).

O solenóide principal é constituído de 20 bobinas da primeira espécie ($\phi_{int} = 100,0$ mm), enquanto que os solenóides do canhão e do coletor são compostos respectivamente por 10 e 4 bobinas da segunda espécie ($\phi_{int} = 250,0$ mm).

As bobinas do solenóide principal são ligadas eletricamente em série através de 4 tiras de cordoalhas estanhadas de cobre de 1" de largura. Para as bobinas dos solenóides do canhão e do coletor, utiliza-se também a ligação elétrica em série com apenas 2 cordoalhas de 1", pois neste caso as exigências de potência elétrica são menores. A resistência de contato bobina-cordoalha é muito pequena (< 1 m Ω).

As bobinas magnéticas são também refrigeradas a água devido às altas correntes envolvidas na produção do perfil axial de indução magnética de alta intensidade. Portanto, 20 circuitos paralelos de refrigeração são colocados entre dois distribuidores de água para retirar calor do solenóide principal (ver nas Figuras 3.1 e 3.2 os distribuidores na posição vertical). Para retirar o calor dos solenóides do canhão e do coletor, mais 14 circuitos paralelos de refrigeração são colocados entre outro par de distribuidores, sendo 10 circuitos usados para resfriar as bobinas do canhão e os 4 circuitos restantes para as bobinas do coletor (ver nas Figuras 3.1 e 3.2 os distribuidores na posição horizontal). Tubos de "poly-flo" com $\phi_{ext} = 1/4$ " fazem a ligação hidráulica entre os distribuidores de água e as bobinas magnéticas, conforme pode ser observado na Figura 3.1.



Fig. 3.1 - Fotografia do sistema de bobinas magnéticas, incluindo estrutura de suporte e distribuidores de água.

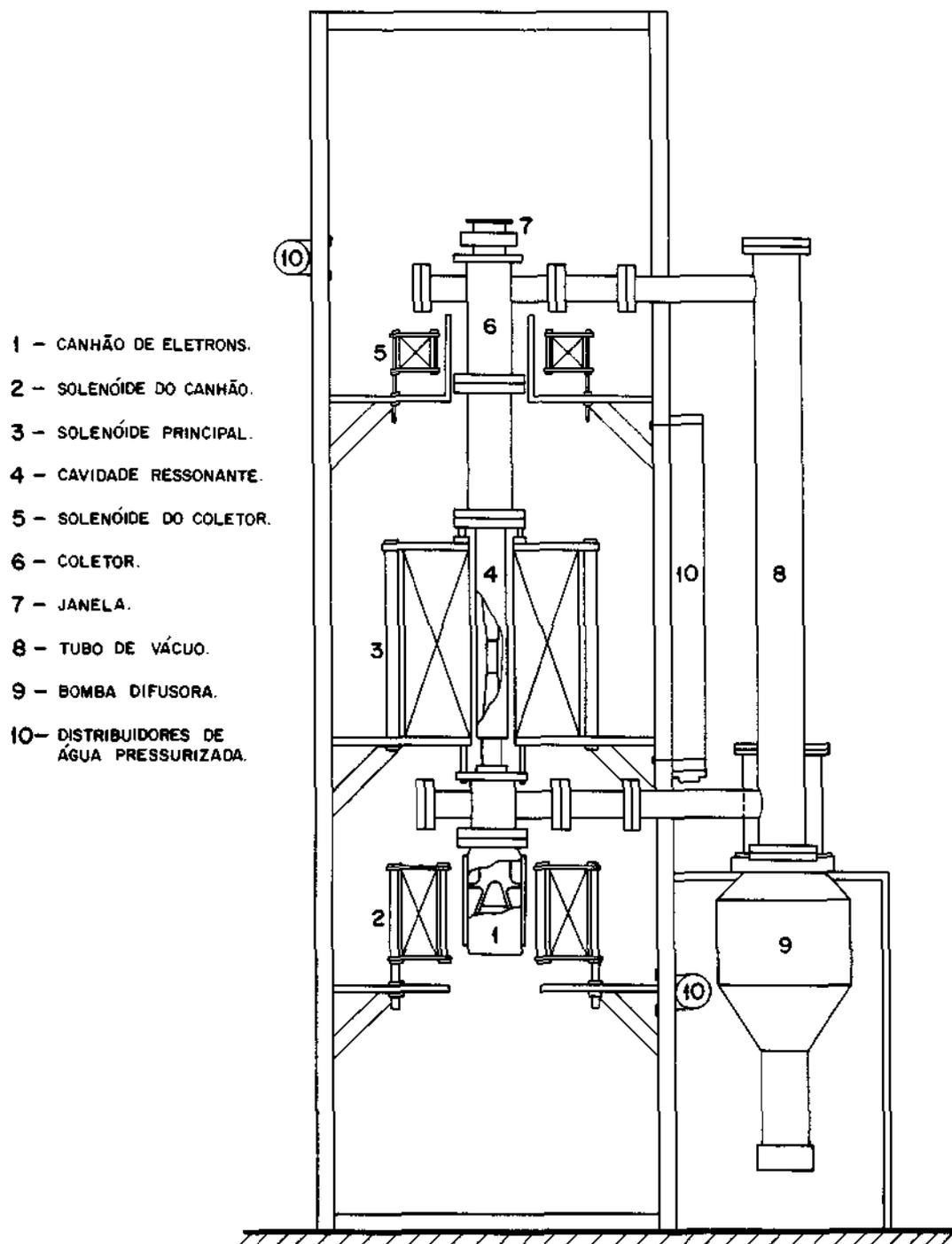


Fig. 3.2 - Esquema detalhado do girotron e estrutura de suporte.

CAPÍTULO 4

MAPEAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO

O projeto conceitual do girotron de 35 GHz do LAP/INPE requer um perfil axial de indução magnética com 3 patamares de campo (1,05 kG, 0,65 kG e 13,2 kG) respectivamente nas regiões do catodo, cavidade e coletor, conforme discutido anteriormente. O patamar de 13,2 kG na região da cavidade ressonante não deve variar muito, tanto no espaço quanto no tempo, devendo ficar restrito a um intervalo de 0,1% de flutuação máxima. Deve-se isto ao fato da condição de ressonância ciclotrônica depender do campo magnético (ver equações 1.1 e 1.2). Se o campo varia espacialmente ou temporalmente, o modo nominal (TE_{021}) de oscilação pode não apresentar estabilidade em frequência. Portanto, uma regulação de corrente menor do que 0,1% (fator de ondulação) é recomendável para a fonte de alimentação do solenóide principal, pois a flutuação de corrente está relacionada com a variação temporal do campo magnético. Em relação à variação no espaço uma perturbação espacial máxima de 0,1% também pode ser tolerada na região da cavidade.

Conseqüentemente, o trabalho de mapeamento consiste em levantar o perfil axial de indução magnética e medir a variação espacial do campo magnético na região da cavidade ressonante, com finalidade de verificar:

- 1) se o perfil axial experimental é compatível com o perfil calculado teoricamente;
- 2) se a variação relativa espacial do campo é inferior a 0,1%.

4.1 MEDIÇÃO DO PERFIL AXIAL DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

Um magnetômetro convencional (Gaussímetro) é usado para determinar o perfil axial de indução magnética. Uma sonda magnética axial do magnetômetro é deslocada verticalmente ao longo do eixo do sistema de solenóide para fazer a medição da intensidade de campo em uma determinada posição z . A Figura 4.1 mostra o sistema de medição utilizado, onde um sistema de polias e de molas possibilita o deslocamento da sonda, e uma escala graduada fornece a medida da posição axial z . A faixa emissora do canhão é tomada como a origem do sistema de referência ($z = 0$).

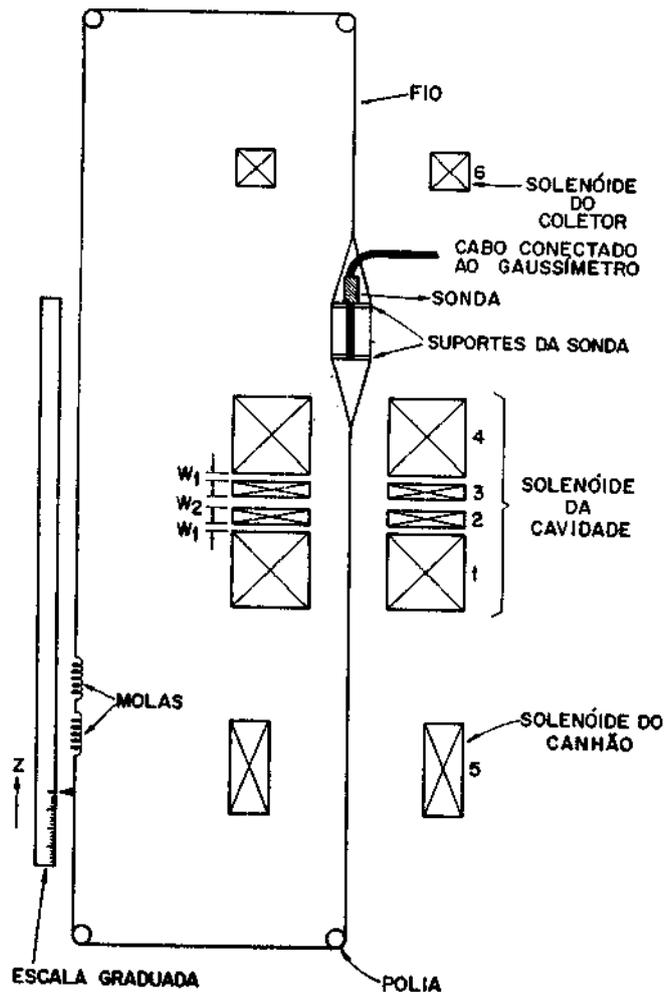


Fig. 4.1 - Sistema de medição do perfil axial de indução magnética.

Uma condição necessária para que a variação temporal não interfira na medição do perfil axial é que o fator de ondulação das fontes utilizadas seja de pequeno valor (de preferência menor do que 0,1%).

O perfil axial de indução magnética do sistema de bobinas magnéticas é composto pela superposição dos três campos produzidos pelos solenóides do canhão, cavidade e coletor. Dessa forma, é importante verificar se tais distribuições de campos magnéticos concordam com os perfis axiais calculados teoricamente. As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 mostram os perfis axiais, teórico e experimental, para cada um dos solenóides. Nestas figuras, observa-se a boa concordância entre os pontos experimentais e as curvas teóricas para os 3 solenóides. Esta curvas teóricas são obtidas a partir de uma expressão que calcula a intensidade do campo magnético no interior de um solenóide em função de uma posição axial ao longo do seu eixo (ver Apêndice A). Para não haver necessidade de refrigeração das bobinas magnéticas, as correntes I

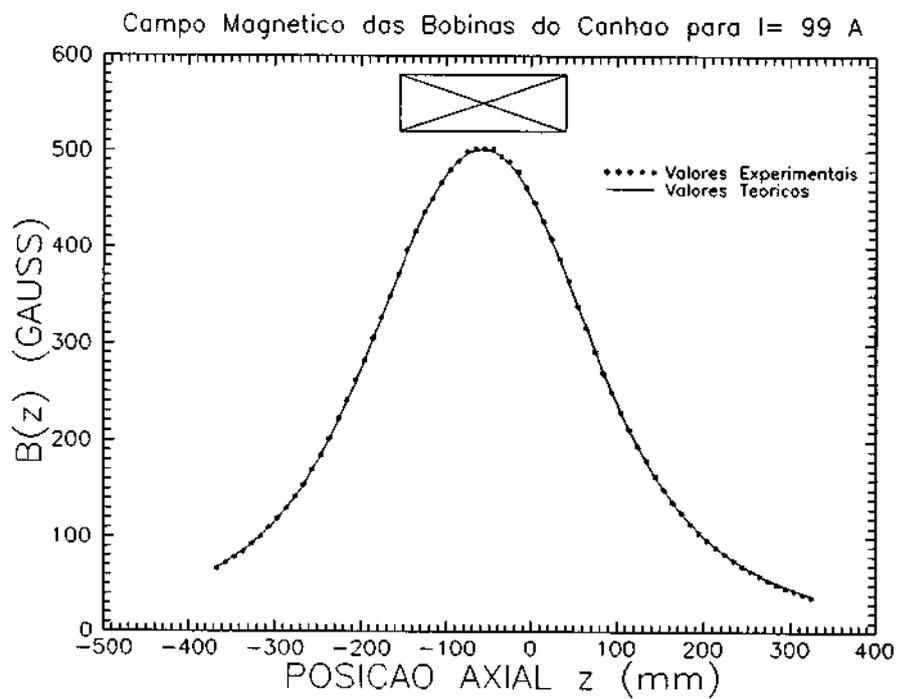


Fig. 4.2 - Perfil axial de indução magnética do solenóide do canhão.

nos solenóides durante a medição do perfil axial devem ser limitadas a baixos valores ($I < 100$ A). Durante esta fase de mapeamento, é importante saber que quando as correntes atingem altos valores, os “shunts” de medição podem sofrer alteração de resistência devido ao efeito ôhmico. Então, deve-se atentar aos valores medidos de corrente porque eles podem ser falsos.

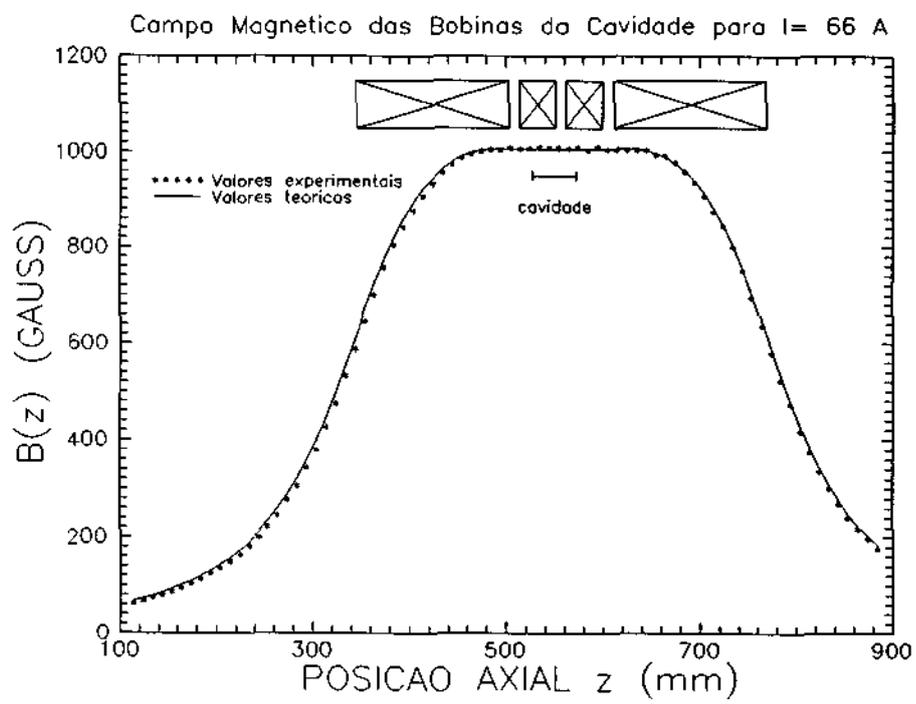


Fig. 4.3 - Perfil axial de indução magnética do solenóide principal.

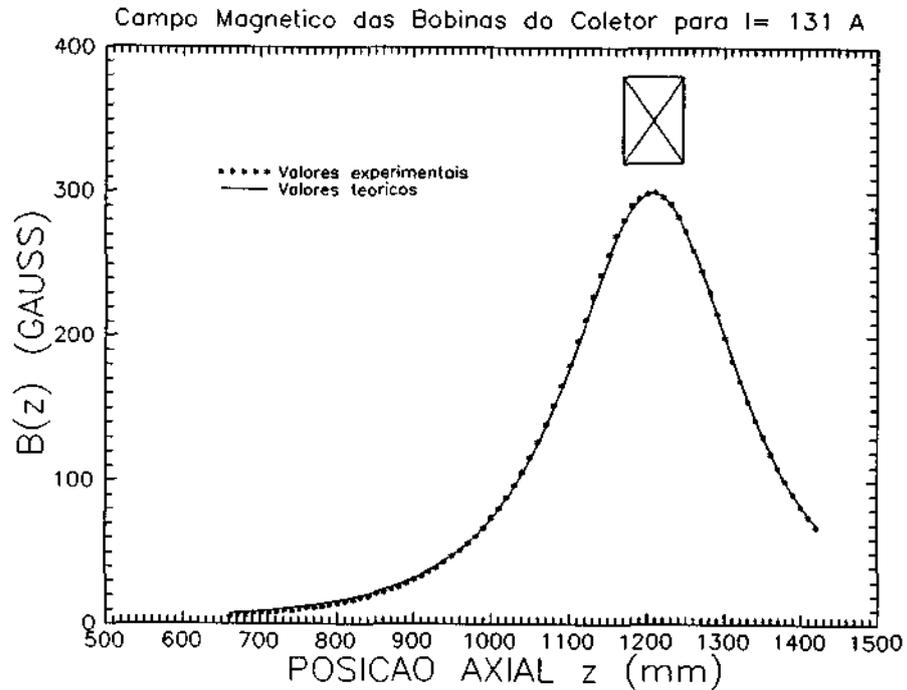


Fig. 4.4 - Perfil axial de indução magnética do solenóide do coletor.

Nas Figuras 4.1 e 4.3, os solenóides laterais do magneto da cavidade são compostos por 8 bobinas e os centrais por duas bobinas cada um, totalizando 20 bobinas. O espaçamento de 11 cm (w_1) entre os solenóides central e lateral e de 10 cm (w_2) entre os dois centrais é conseguido através do uso de separadores isolantes colocados entre as bobinas magnéticas da cavidade. Toda esta exigência de construção para o solenóide principal é importante para obtenção de um patamar de campo magnético com extensão maior do que 13 cm na região da cavidade. Na Figura 4.3, observa-se um patamar de campo de 20 cm aproximadamente. Neste caso, é preciso levar em consideração a contribuição de campo dos 4 solenóides do magneto principal para o cálculo do perfil axial teórico.

Para a medição do perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides, é necessário calcular as correntes em cada solenóide para a obtenção dos patamares de campo de 1,05 kG, 13,2 kG e 0,65 KG respectivamente nas regiões do canhão, cavidade e coletor. Entretanto, para não haver necessidade de refrigeração dos magnetos, admite-se um fator de redução de 10 para o campo magnético. Portanto, as correntes ficam também reduzidas pelo mesmo fator de 10, visto que a relação entre campo magnético e corrente é linear. Com este fator de redução no campo magnético, a análise do perfil axial não fica invalidada, pois o importante é a forma do perfil e não o valor do campo. Além disso, considera-se a contribuição de cada um dos 6 solenóides que compõem o sistema para cada ponto do perfil axial (lembrar que o magneto principal constitui-se de outros 4 solenóides). Dessa forma, pode-se montar o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{aligned} B(z_1) &= B_5(z_1, I_{can}) + B_1(z_1, I_{cav}) + B_2(z_1, I_{cav}) + \\ &+ B_3(z_1, I_{cav}) + B_4(z_1, I_{cav}) + B_6(z_1, I_{col}) = 105, \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} B(z_2) &= B_5(z_2, I_{can}) + B_1(z_2, I_{cav}) + B_2(z_2, I_{cav}) + \\ &+ B_3(z_2, I_{cav}) + B_4(z_2, I_{cav}) + B_6(z_2, I_{col}) = 1320, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} B(z_3) &= B_5(z_3, I_{can}) + B_1(z_3, I_{cav}) + B_2(z_3, I_{cav}) + \\ &+ B_3(z_3, I_{cav}) + B_4(z_3, I_{cav}) + B_6(z_3, I_{col}) = 65, \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde:

- $B(z)$ = campo magnético total;
- $B_5(z, I)$ = componente de campo magnético do solenóide do canhão;
- $B_1(z, I)$, $B_2(z, I)$, $B_3(z, I)$ e $B_4(z, I)$ = componentes de campo magnético do solenóide principal;
- $B_6(z, I)$ = componente de campo magnético do solenóide do coletor;
- $z = z_1$ = posição axial da faixa emissora;
- $z = z_2$ = posição axial do centro do solenóide da cavidade;

- $z = z_3 =$ posição axial do centro do solenóide do coletor;
- $I = I_{can} =$ corrente que flui pelas bobinas do canhão;
- $I = I_{cav} =$ corrente que flui pelas bobinas da cavidade;
- $I = I_{col} =$ corrente que flui pelas bobinas do coletor.

Como a faixa emissora é tomada como a origem do sistema de referência, obtém-se que $z_1 = 0$, $z_2 = 0,557$ m e $z_3 = 1,208$ m. Substituindo-se estes valores no sistema de equações lineares e utilizando-se a expressão do Apêndice A para o cálculo de B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 e B_6 , pode-se chegar aos valores das correntes dos solenóides: $I_{can} = 13,2$ A, $I_{cav} = 86,2$ A e $I_{col} = 16,2$ A.

A Figura 4.5 mostra os perfis axiais teórico e experimental de indução magnética do sistema de solenóides com um fator de redução de 10 e correntes nos magnetos do canhão, cavidade e coletor mantidas em 13,2 A, 86,2 A e 16,2 A respectivamente. Observa-se uma boa concordância entre os perfis axiais e teórico. Entretanto, o patamar de campo na região da cavidade ressonante é aproximadamente de 1400 G. Isto deve-se ao mascaramento do valor exato de corrente provocado pelas perdas ôhmicas no “shunt” de medição, pois a corrente no solenóide principal possui um valor relativamente alto ($I_{cav} \approx 100$ A). O ajuste da curva teórica com os pontos experimentais no gráfico é feito considerando-se que o valor exato medido da corrente do magneto da cavidade deve ser aproximadamente de 91,0 A (e não de 86,2 A). Os patamares de campo (obtidos na Figura 4.5) nas regiões do canhão e do coletor são respectivamente 105 G e 65 G. Estes valores de campo estão de acordo com os valores de projeto porque a corrente do solenóide principal possui uma influência menor sobre os campos dos outros dois magnetos devido às distâncias envolvidas e, além disso, a variação de corrente foi pequena.

Todos os gráficos das Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são obtidos através de um pacote gráfico de programas denominado GRAPHER. Este pacote permite criar arquivos onde são incluídos os pontos a serem mostrados no gráfico. Os pontos experimentais são obtidos através das medidas de campo magnéticos ao longo da posição axial z e os pontos teóricos através de programas desenvolvidos para o cálculo do campo magnético. No caso do solenóide da cavidade, o somatório das expressões para $B_1(z)$, $B_2(z)$, $B_3(z)$ e $B_4(z)$ é usado para o cálculo do campo magnético total. E para o caso do cálculo do campo magnético total do sistema de solenóides, o somatório utilizado contém as expressões para $B_1(z)$, $B_2(z)$, $B_3(z)$, $B_4(z)$, $B_5(z)$ e $B_6(z)$. O Apêndice B apresenta, como exemplo, o programa desenvolvido em linguagem “C” para o cálculo do perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides.

Perfil axial de inducao magnetica do girotron/LAP/INPE

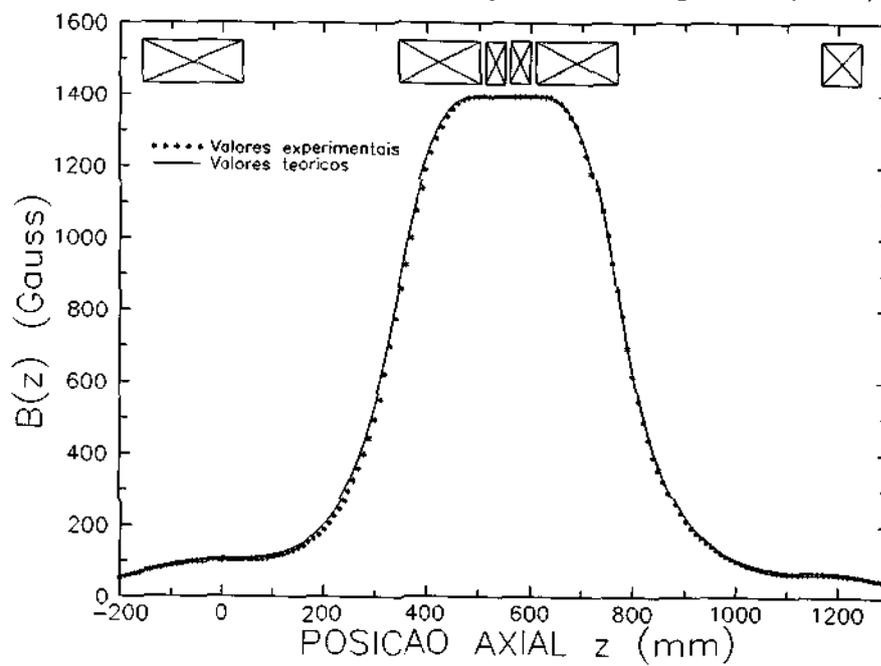


Fig. 4.5 - Perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides.

4.2 MEDIDA DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO CAMPO MAGNÉTICO

A medida da variação espacial do campo magnético não pode ser feita pelos magnetômetros convencionais (Gaussímetros) com precisão menor do que 0,1%. Dessa maneira, desenvolveu-se um método alternativo que consiste na medida espacial da diferença de amplitude entre dois sinais, e_1 e e_2 , os quais são sinais de uma bobina de referência e de uma sonda magnética respectivamente. A Figura 4.6 ilustra o sistema de medida empregado.

O grupo de 20 bobinas do solenóide principal é alimentado com corrente a.c., frequência 60 Hz, para provocar o aparecimento das tensões induzidas e_1 e e_2 . A diferença entre estes dois sinais ($e_{s_1} - e_{s_2}$), com a bobina móvel no centro do magneto, é ajustada para ser nula. A corrente a.c. do magneto é fornecida por um transformador abaixador de tensão de 220 V/12,6 V e um autotransformador. A corrente no magneto é limitada a alguns amperes de corrente para não haver necessidade de refrigeração. Então, um campo magnético B_o de várias dezenas de gauss pode ser produzido no centro solenóide.

Para este sistema de medida, escolhe-se 5 voltas ($N_1 = 5$) de fio de cobre 14 AWG para a construção da bobina de referência e 2000 voltas ($N_2 = 2000$) com diâmetro $\phi = 64 \mu\text{m}$ para a construção da sonda magnética. Desta forma, obtém-se uma tensão induzida (e_1 ou e_2) da ordem de 15 mV para $B_o = 10$ G. Como este sinal é de baixo valor, uma amplificação de 10 vezes é exigida. Isto é conseguido com o emprego do circuito amplificador e isolador com ganho $G = 10$, mostrado na Figura 4.7. Este circuito possui alta impedância de entrada ($Z_{in} > 1M\Omega$), baixa impedância de saída ($Z_{out} < 1\Omega$) e a função de evitar interferência eletromagnética entre a sonda e a bobina de referência.

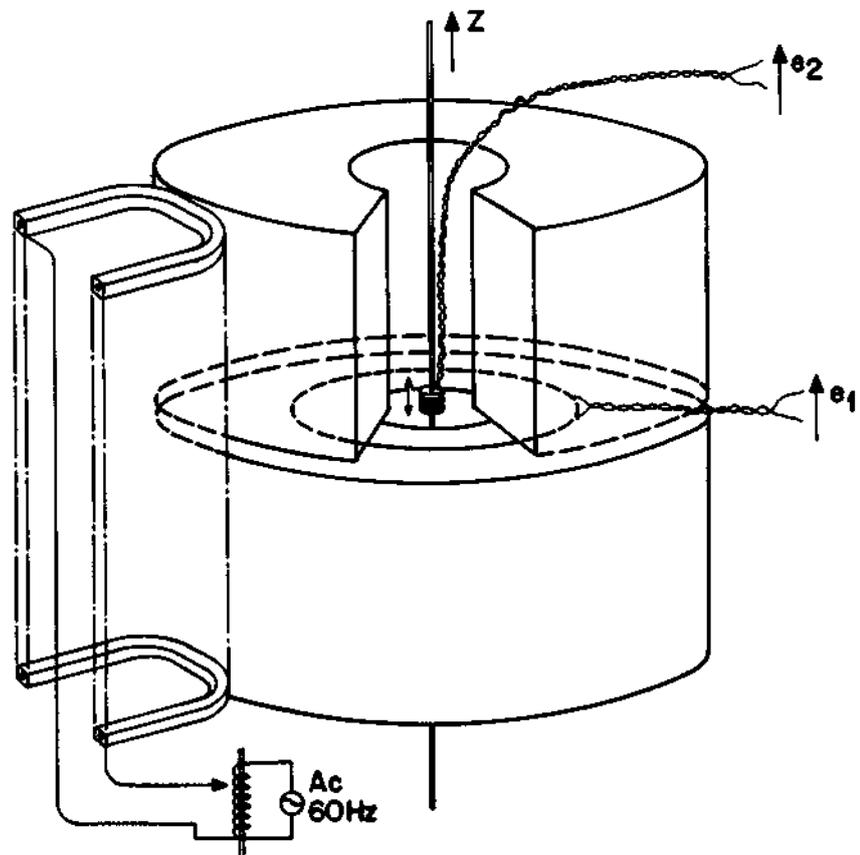


Fig. 4.6 - Sistema de medida da variação espacial do campo magnético; e_1 = tensão induzida na bobina de referência (bobina na seção média do magneto); e_2 = tensão induzida na sonda magnética (bobina móvel).

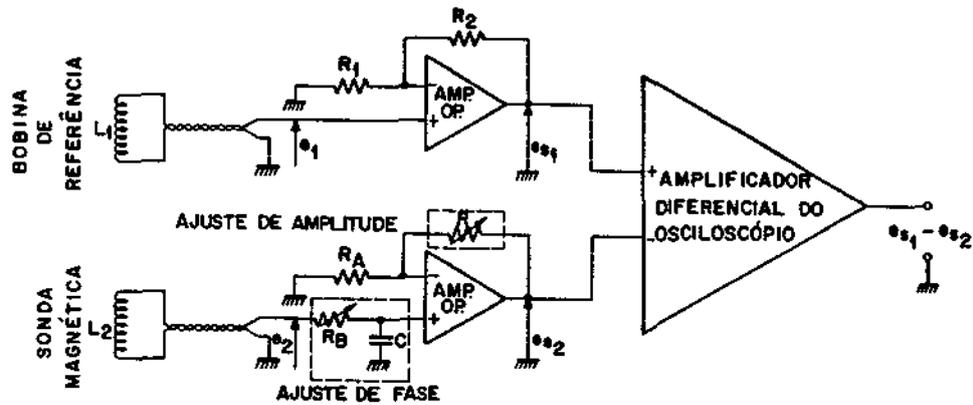


Fig. 4.7 - Circuito amplificador e isolador.

O sinal e_{s2} é ajustado no circuito amplificador para que a diferença $e_{s1} - e_{s2}$ seja nula na saída do amplificador diferencial do osciloscópio. Desde que os dois sinais são senóides com a mesma frequência ($f = 60 \text{ Hz}$), a amplitude e a fase devem ser ajustadas. O primeiro ajuste é feito através do resistor variável R e o segundo ajuste através do potenciômetro R_B no circuito de compensação de fase. Através deste processo de cancelamento obtém-se uma precisão máxima de 0,01% ($< 0,1\%$).

A medida da variação espacial do campo magnético ($\Delta B/B$) inicia-se com o cancelamento dos sinais e_1 e e_2 , com a sonda colocada no centro do magneto. Variando-se a posição da sonda ao longo do eixo z , obtém-se um valor de tensão residual ($\Delta e = e_{s1} - e_{s2}$) para uma determinada posição axial, onde Δe pode ser medido através do amplificador diferencial do osciloscópio. Entretanto, antes de fazer qualquer medida, deve-se ajustar a fase da tensão residual com a fase da bobina de referência. A Figura 4.8 mostra a variação espacial do campo magnético obtida ao longo do eixo z do solenóide principal.

Através da Figura 4.8, conclui-se que os resultados obtidos fornecem uma variação do campo magnético menor do que 0,1% na região da cavidade.

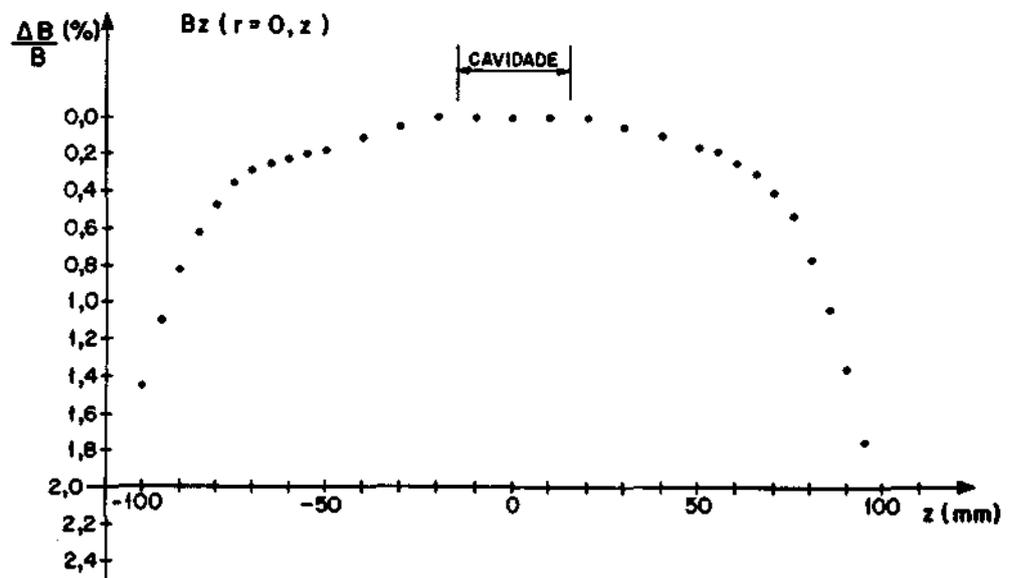


Fig. 4.8 - Variação espacial do campo magnético principal ao longo do eixo z . Origem $z = 0$ colocada no centro do magneto da cavidade.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar a construção e o mapeamento do campo magnético do sistema de solenóides do girotron. Este sistema é uma parte importante do girotron, porque a frequência do modo nominal de oscilação (TE_{021}) depende diretamente do campo magnético na região da cavidade ressonante.

Em termos construtivos, as bobinas são reforçadas com fibra de vidro embebida em resina "epoxy" para compensar as forças magnéticas de repulsão. Uma importante característica apresentada pelas bobinas magnéticas da cavidade é a resistência medida de $7,0\text{ m}\Omega$. Este valor concorda com o valor estimado de $7,5\text{ m}\Omega$ por bobina.

Com relação ao mapeamento do campo magnético, o perfil axial medido por um magnetômetro convencional é compatível com o perfil axial teórico obtido através de um programa desenvolvido em linguagem "C". Este programa calcula o campo magnético total ao longo do eixo z do sistema de solenóides, levando em conta a contribuição de cada magneto. O perfil axial fornecido está com um fator de redução 10 para não haver necessidade de refrigeração dos magnetos. Entretanto, o patamar de campo obtido na região da cavidade ressonante está com um valor (1400 G) acima daquele esperado (1320 G). Isto pode ser explicado pelo efeito "Joule" ocorrido no "shunt" de medição que mascara o valor medido de corrente. Através do ajuste da curva teórica com os pontos experimentais, chega-se à conclusão de que a corrente é mantida em 91,0 A no solenóide principal e não em 86,2 A como desejado. Esta pequena elevação do valor de corrente é suficiente para elevar a altura do patamar de campo na região da cavidade para 1400 G. Porém, a menor influência do magneto principal nas regiões do canhão e do coletor não é suficiente para alterar significativamente os patamares de campo nestas regiões, que permanecem respectivamente em 105 G e 65 G.

A variação espacial do campo magnético medida na região do patamar da cavidade é menor do que 0,1%. Este valor medido está dentro das especificações de projeto. A medida da variação espacial é realizada através de um método alternativo que consiste na medida da diferença de amplitude entre dois sinais obtidos a partir de uma bobina de referência e de uma sonda magnética. Neste caso, não há possibilidade de fazer estas medidas com a ajuda de um magnetômetro convencional.

Finalmente, conclui-se que os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com aqueles esperados durante a fase do projeto do sistema de bobinas magnéticas do girotron de 35 GHz ora em construção no LAP/INPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Barroso, J.J.; Montes, A.; Ludwig, G.O.; Correa, R.A. Design of a 35 GHz gyrotron. **International Journal of Infrared Millimeter Waves**, **11** (2): 251-274, feb. 1990.
- (2) Montgomery, D.B. Solenoid magnet design. New York, **John Wiley & Sons**, 1969, p. 10.
- (3) Knoepfel, H. Pulsed high magnetic fields. Amsterdam, North-Holland, **Publishing Company**, 1970, p. 319.
- (4) Kernighan, B.W.; Ritchie, D.M. C: a linguagem de programação . Rio de Janeiro, **Editora Campus**, 1986, p. 140-143.

APÊNDICE A

CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO NO INTERIOR DE UM SOLENÓIDE ESPESSO

A Figura A.1 mostra uma vista da seção de corte de um solenóide espesso:

O cálculo do campo magnético (Knoepfel (3)) no interior do solenóide ao longo do seu eixo axial num ponto z pode ser dado pela expressão:

$$B(z') = \frac{\mu_0 N I}{2h(b-a)} \left[z' \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + z'^2}}{a + \sqrt{a^2 + z'^2}} \right) + (h - z') \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + (h - z')^2}}{a + \sqrt{a^2 + (h - z')^2}} \right) \right], \quad (\text{A.1})$$

onde:

- N = número de espiras do solenóide;
- I = corrente em A que flui pelo solenóide;
- μ_0 = permeabilidade magnética = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;
- z' = posição axial em m ;
- b = raio externo em m ;

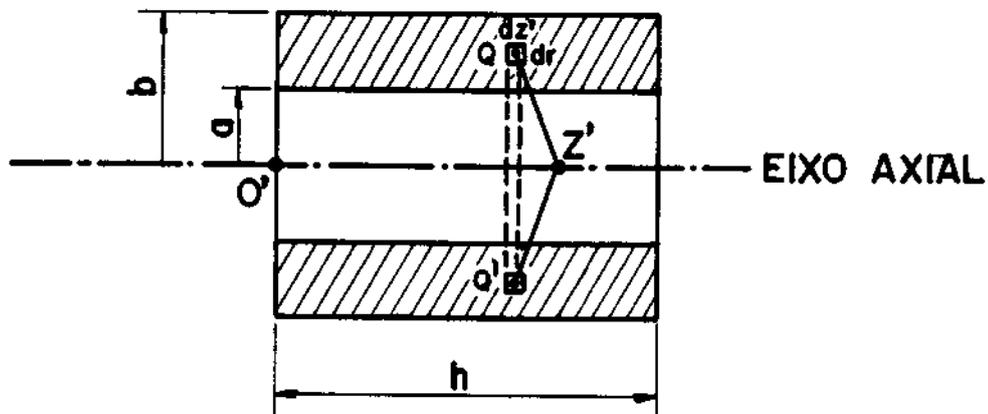


Fig. A.1 - Seção de corte de um solenóide espesso.

- a = raio interno em m ;
- h = comprimento do solenóide em m .

Na Equação (A.1), a origem O' do sistema de referência z' é colocada na borda esquerda do solenóide. Entretanto, na medição do perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides a origem do sistema de referência z é considerada como sendo a faixa emissora do canhão. Portanto, deve-se processar a seguinte mudança de coordenadas para cada solenóide do sistema:

$$z' = z - K(\text{Cte}), \quad (\text{A.2})$$

onde:

- $K = -0,156$ para o solenóide do canhão;
- $K = 0,345$ para o 1° solenóide da cavidade;
- $K = 0,514$ para o 2° solenóide da cavidade;
- $K = 0,562$ para o 3° solenóide da cavidade;
- $K = 0,611$ para o 4° solenóide da cavidade;
- $K = 1,169$ para o solenóide do coletor.

APÊNDICE B

PROGRAMA DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO DO SISTEMA DE SOLENÓIDES

Este programa calcula o valor do campo magnético em qualquer posição axial z ao longo do eixo do sistema de solenóides, levando em conta os componentes de campo dos 6 magnetos. Este programa está escrito em linguagem "C" porque os padrões de escrita do "C" no arquivo gerado é mais simples e consome um tempo menor de processamento em relação a outras linguagens como, por exemplo, FORTRAN. Maiores esclarecimentos sobre a linguagem "C" podem ser obtidos em Kernighan (4).

A 1ª parte do programa consiste nas declarações de todas variáveis usadas e do apontador de arquivo, pois isto é um requisito básico desta linguagem. A declaração do apontador de arquivo é dada por "FILE *fp".

A 2ª parte consiste na abertura do arquivo (CMAG.DAT) para a gravação dos dados. A chamada do arquivo é dada por "fp=fopen (name, mode)", onde "name" é o nome do arquivo e "mode" são os modos permitidos como: leitura (r), gravação (w) e adição (a).

A 3ª parte do programa contém o cálculo do campo magnético, havendo primeiro uma mudança de coordenadas (ver Apêndice A) e, depois, o somatório das contribuições de campo de cada solenóide (B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 e B_6) para fornecer o campo total BT .

Finalmente, a última parte consiste no fechamento do arquivo utilizado, através da instrução "fclose", e na subrotina "float B". Esta subrotina é usada para o cálculo do campo de cada solenóide durante a 3ª parte do programa.

A listagem do programa é dada logo a seguir.

```

#include <stdio.h>;
#include <stdlib.h>;
#include <conio.h>;
#include <math.h>;

float B();
float pi,uo;

main()
{
float a1=0.050,a2=0.125,b=0.203;
float x,z1,z2,z3,z4,z5,z6;
float B1,B2,B3,B4,B5,B6,BT;
FILE *fp;
pi=4*atan(1);
uo=4*pi*1.0e-7;
system("DEL A:CMAG4.DAT");
if((fp=fopen("A:CMAG4.DAT","w"))==NULL)
{
printf("\n nao consegue acessar arquivo\n");
exit(1);
}
for(x=-250.0;x<=1500.0;x=x + 10.0)
{
z1 = (x-345.0) / 1000.0;
z2 = (x-514.0) / 1000.0;
z3 = (x-562.0) / 1000.0;
z4 = (x-611.0) / 1000.0;
z5 = (x+156.0) / 1000.0;
z6 = (x-1169.0) / 1000.0;
B1 = B(z1,256,a1,b,0.158,91.0);
B2 = B(z2,64,a1,b,0.038,91.0);
B3 = B(z3,64,a1,b,0.038,91.0);
B4 = B(z4,256,a1,b,0.158,91.0);
B5 = B(z5,160,a2,b,0.196,13.2);
B6 = B(z6,64,a2,b,0.078,16.2);
BT = B1+B2+B3+B4+B5+B6;
BT = BT*1.0e4;
fprintf(fp,"%5.2f %5.2f\n",x,BT);
printf("%5.2f %5.2f\n",x,BT);
}
fclose(fp);
printf("\n Arquivo gravado \n");
}

float B(z,N,a,b,h,i) /*calculo do campo magnetico*/
float z,a,b,h,i;
int N;
{
float y,delta,gamma;

delta = z * log((b + sqrt(pow(b,2) + pow(z,2))) / (a + sqrt(pow(a,2)
pow(z,2)))));
gamma = (h - z) * log((b + sqrt(pow(b,2) + pow((h - z),2))) / (a +
sqrt(pow(a,2) + pow((h - z),2))));
y = uo * N * i / (2 * h * (b - a)) * (delta + gamma);

return(y);
}

```

**Secretaria da Ciência e Tecnologia
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

INPE-5359-PRP/163

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE
BOBINAS MAGNÉTICAS DE 13 kG**

J.O. Rossi
Y. Aso
P.J. Castro
J.J. Barroso
G.O. Ludwig
A. Montes
M.C.A. Nono
R.A. Correa

Este trabalho consiste num relatório das atividades desenvolvidas durante a construção do sistema de bobinas magnéticas do girotron do LAP. Ele foi apresentado na 42a. Reunião Anual da SBPC, Porto Alegre, RS, 1990.

INPE
São José dos Campos
Agosto de 1991

CDU: 533.9

Palavras-Chave: Girotron; Bobinas Magnéticas

RESUMO

Neste trabalho, a construção do sistema de bobinas magnéticas de um girotron de 35 GHz é descrita com bastante detalhe. Este sistema é projetado para gerar uma indução magnética de 13,2 kG sobre uma extensão de 13 cm. Usando-se uma corrente de aproximadamente 100 A, é verificado que o perfil axial do campo magnético e a não-uniformidade espacial estão de acordo com aqueles previstos teoricamente.

CONSTRUCTION OF A 13 kG COIL SYSTEM

ABSTRACT

The construction of magnetic coil system for a 35 GHz gyrotron is reported in great detail. This system is designed to generate a magnetic induction of 13,2 kG over an extension of 13 cm. By using an operating current of about 100 A, it was verified that both the axial magnetic field profile and the spatial non-uniformity are in close agreement with those theoretically predicted.

SUMÁRIO

	Pag.
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 CONSTRUÇÃO DA BOBINA MAGNÉTICA ...	3
CAPÍTULO 3 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS	14
CAPÍTULO 4 MAPEAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO ...	17
4.1 MEDIÇÃO DO PERFIL AXIAL DE INDUÇÃO MAGNÉTICA ...	17
4.2 MEDIDA DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO CAMPO MAGNÉTICO ..	25
CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
APÊNDICE A CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO NO INTERIOR DE UM SOLENÓIDE ESPESSE	31
APÊNDICE B PROGRAMA DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO DO SISTEMA DE SOLENÓIDES	33

LISTA DE FIGURAS

	Pag.	
1.1	Desenho esquemático do girotron.	1
2.1	Seção transversal do fio de cobre; $a = 8,81$ mm; $b = 9,05$ mm; $\phi = 4,93$ mm; $e = 0,12$ mm (camada isolante); $S = 58,23$ mm ² (área ativa).	3
2.2	Corte transversal de uma bobina; $a_1 = 50,0$ mm para a bobina da cavidade; $a_1 = 125,0$ mm para a bobina do canhão ou do coletor; $a_2 = 203,0$ mm para todas as bobinas.	4
2.3	Fotografia das bobinas magnéticas da cavidade sendo submetidas a testes de alta pressão.	5
2.4	Ponte de "Wheatstone" para a medição de resistência R_{20} da bobina da cavidade.	8
2.5	Caso 1: medição da resistência total com contato normal. $M =$ número da medida. * - não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande. $\bar{R}_4 = [R_4(1) + R_4(2) + R_4(4) + R_4(5)]/4 \simeq 49,85$ m Ω .	9
2.6	Caso 2: medição da resistência de contato normal. $M =$ número da medida. * não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande.	10
2.7	Caso 3: medição da resistência de contato de conector e de solda. $M =$ número da medida.	11
2.8	Caso 4: medição da resistência total com contato de solda. $M =$ número da medida.	12
2.9	Caso 5: medição da resistência de contato de solda. $M =$ número da medida.	13
3.1	Fotografia do sistema de bobinas magnéticas, incluindo estrutura de suporte e distribuidores de água.	15
3.2	Esquema detalhado do girotron e estrutura de suporte.	16
4.1	Sistema de medição do perfil axial de indução magnética.	18
4.2	Perfil axial de indução magnética do solenóide do canhão.	19
4.3	Perfil axial de indução magnética do solenóide principal.	20
4.4	Perfil axial de indução magnética do solenóide do coletor.	21
4.5	Perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides.	24
4.6	Sistema de medida da variação espacial do campo magnético; $e_1 =$ tensão induzida na bobina de referência (bobina na seção média do magneto); $e_2 =$ tensão induzida na sonda magnética (bobina móvel).	26
4.7	Circuito amplificador e isolador.	27
4.8	Variação espacial do campo magnético principal ao longo do eixo z . Origem $z = 0$ colocada no centro do magneto da cavidade.	28
A.1	Seção de corte de um solenóide espesso.	31

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresenta-se a descrição do sistema de bobinas magnéticas empregado para a produção de um campo magnético de alta intensidade. Este campo magnético servirá para colocar em operação um girotron em 35 GHz, que está sendo desenvolvido pelo Laboratório Associado de Plasma - LAP do INPE.

O girotron é um tubo de microondas baseado na interação entre um feixe de elétrons e o campo eletromagnético numa cavidade ressonante, conforme mostra a Figura 1.1. O feixe eletrônico é produzido quando os elétrons são arrancados da faixa emissora no canhão. Para que isso ocorra, o filamento do girotron deve ser previamente aquecido e o canhão deve operar com tensão de feixe da ordem de -50 kV com uma tensão típica de 1º anodo de -25 kV. O 2º anodo, conectado ao corpo do girotron (tensão de $0V$), é responsável pela aceleração do feixe eletrônico. Quando os elétrons chegam à região da cavidade, ocorre uma interação entre eles e um modo eletromagnético normal da cavidade em que parte da energia do feixe é transferida para os campos de radiofrequência. Esta energia transferida provém do movimento ciclotrônico dos elétrons.

Uma importante característica do girotron é que ele requer a aplicação de um campo magnético externo, o qual está especificamente relacionado com a frequência de operação, dada pela condição de ressonância ciclotrônica. Esta relação é dada pela seguinte equação :

$$\omega = n\omega_c, \quad (1.1)$$

onde ω é a frequência de operação (em rad/s), n é o número harmônico e ω_c é a frequência ciclotrônica ou a velocidade angular (em rad/s) dada por:

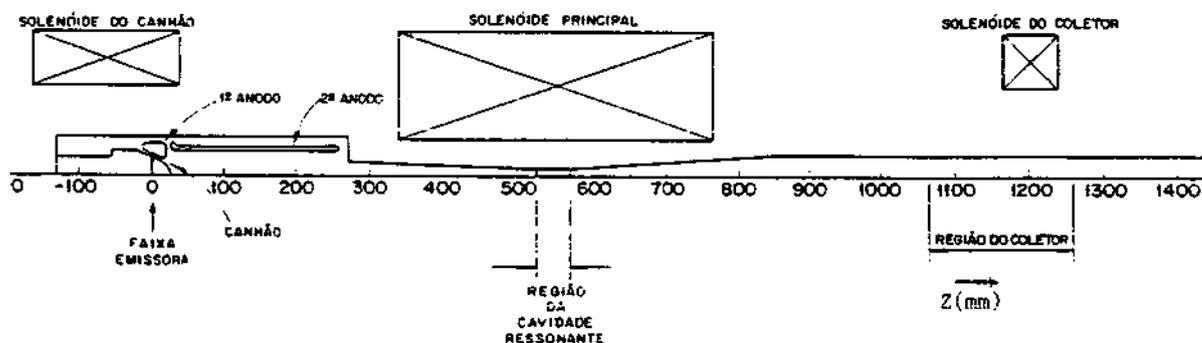


Fig. 1.1 - Desenho esquemático do girotron.

$$\omega_c = \frac{eB}{\gamma m_o}, \quad (1.2)$$

onde B é o campo magnético (em tesla), e é a carga do elétron (em Coulomb) e γm_o é a massa relativística da elétron (em Kg). Uma interação de alta eficiência ocorre somente quando a relação (1.1) é verificada.

O fator relativístico adimensional γ pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\gamma = 1 + \frac{V_F}{511}, \quad (1.3)$$

onde V_F é a tensão do feixe dada em kV .

Através das relações (1.1), (1.2) e (1.3), pode-se calcular que o campo magnético principal B no centro da cavidade para uma frequência fundamental $f = 35 \text{ GHz}$ ($n = 1$) é da ordem de 13 kG , considerando-se que $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_o = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ e $V_F = 50,0 \text{ kV}$.

Na realidade, um perfil axial de indução magnética com três patamares de $1,05 \text{ kG}$, $13,2 \text{ kG}$ e $0,65 \text{ kG}$, dispostos respectivamente nas regiões do canhão, cavidade e coletor, é requerido para a operação do girotron. O valor do patamar do campo magnético de $13,2 \text{ kG}$ sobre uma extensão maior do que 13 cm na região da cavidade está otimizado em função da eficiência máxima de 40% do girotron. Este patamar é produzido pelo solenóide principal alimentado por uma corrente da ordem de 1 kA . O patamar de indução magnética de $1,05 \text{ kG}$ na região do catodo controla o raio do feixe e a velocidade transversal dos elétrons. Na região do coletor, o patamar de $0,65 \text{ kG}$, produzido por outro solenóide auxiliar, faz com que o raio do centro de guia do feixe de elétrons seja igual ao raio interno do coletor de $3,18 \text{ cm}$. Dessa forma, o feixe sempre tende a ser espalhado no coletor, evitando com isso a colisão dos elétrons em partes sensíveis, como as paredes da cavidade ressonante, por exemplo. Os dois solenóides auxiliares e o principal constituem o sistema de bobinas magnéticas responsável pela produção do perfil axial de indução magnética. Maiores esclarecimentos sobre estes detalhes de projeto e outros podem ser obtidos em Barroso (1).

CAPÍTULO 2

CONSTRUÇÃO DA BOBINA MAGNÉTICA

As bobinas magnéticas consistem em um fio de seção quadrada de $9,0 \times 9,0 \text{ mm}^2$ aproximadamente (ver Figura 2.1) enrolado sob a forma de um espiral em duas faces (cada face é constituída de uma panqueca). O fio de seção quadrada é totalmente vazado por um furo de diâmetro $\phi \simeq 5,0 \text{ mm}$ pelo qual flui água pressurizada para resfriar a massa de cobre. As bobinas são enroladas através de uma bobinadeira, especialmente projetada e construída para esta finalidade.

Há duas espécies de bobinas: a primeira espécie com raio interno $a_1 = 50,0 \text{ mm}$ para compor o solenóide principal (ou da cavidade) e a segunda espécie com raio interno $a_1 = 125,0 \text{ mm}$ para compor os solenóides do canhão e do coletor. Ambas as espécies possuem o mesmo raio externo $a_2 = 203,0 \text{ mm}$. A Figura 2.2 mostra um desenho esquemático do corte transversal de uma bobina. A Figura 2.3 mostra a fotografia das bobinas magnéticas da cavidade dispostas sobre uma bancada comum, onde estão sendo feitos os testes de alta pressão ($p_{max} \simeq 15 \text{ atm}$) com gás (N_2) para os conectores de água de refrigeração tipo "poly-flo". Os conectores são soldados nas extremidades das bobinas, tomando-se o cuidado de não entupí-los com solda durante o processo de soldagem.

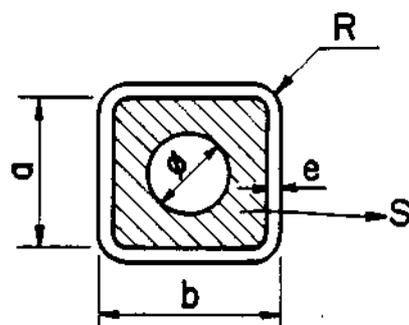


Fig. 2.1 - Seção transversal do fio de cobre; $a = 8,81 \text{ mm}$; $b = 9,05 \text{ mm}$; $\phi = 4,93 \text{ mm}$; $e = 0,12 \text{ mm}$ (camada isolante); $S = 58,23 \text{ mm}^2$ (área ativa).

Como pode ser observado na Figura 2.3, as bobinas são reforçadas por fitas de fibra de vidro embebidas em resina "epoxy" dispostas radialmente na face da bobina e presas na extremidade. Isto é necessário porque apenas a resina "epoxy", colocada nas bordas do fio de cobre durante o processo de enrolamento, não é capaz de suportar os esforços de expansão quando flui uma corrente de 1 kA .

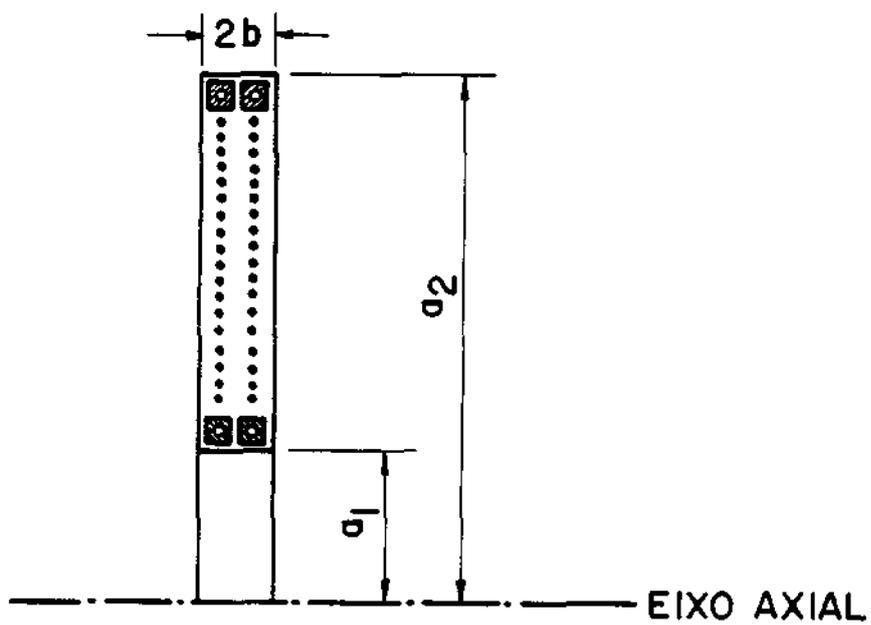


Fig. 2.2 - Corte transversal de uma bobina; $a_1 = 50,0$ mm para a bobina da cavidade; $a_1 = 125,0$ mm para a bobina do canhão ou do coletor; $a_2 = 203,0$ mm para todas as bobinas.

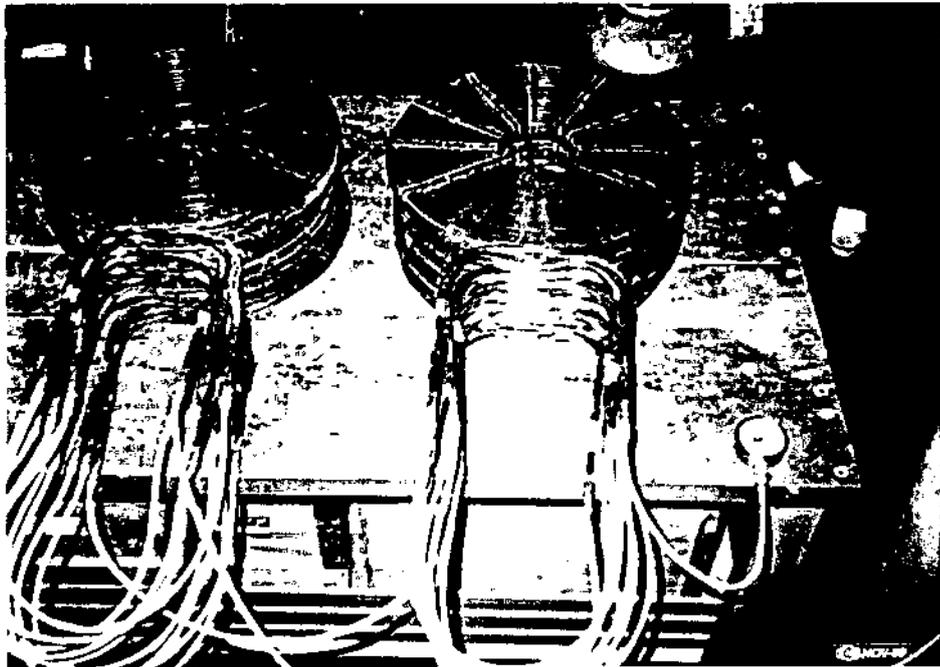


Fig. 2.3 - Fotografia das bobinas magnéticas da cavidade sendo submetidas a testes de alta pressão.

O comprimento do condutor L_t necessário para construir uma bobina pode ser dado pelo número espiras multiplicado pelo comprimento médio da circunferência:

$$L_t = \pi N(a_1 + a_2), \quad (2.1)$$

onde N é o número de espiras de cada bobina.

Calcula-se que L_t é da ordem de 25,0 m para as bobinas da cavidade com $N = 32$, $a_1 = 0,05$ m e $a_2 = 0,203$ m enquanto que $L_t \simeq 16,0$ m para as bobinas do canhão ou coletor com $N = 16$, $a_1 = 0,125$ m e $a_2 = 0,203$ m.

O cálculo de L_t é importante para calcular a resistência de cada bobina e para cortar o fio durante o processo de construção, pois deve-se desenrolar totalmente o comprimento L_t para colocar o fio na bobinadeira. Maiores detalhes sobre construção de bobinas magnéticas podem ser obtidas em Montgomery (2).

O cálculo da resistência R_{20} de cada bobina em função do comprimento L_t na temperatura ambiente ($T = 20^\circ C$) pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$R_{20} = \rho_{20} \frac{L_t}{S} \quad (2.2)$$

onde ρ_{20} é a resistividade do cobre a $20^\circ C$ e S é a área ativa da seção transversal do fio de cobre (ver Figura 2.1). Considerando-se $\rho_{20} = 1,72 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ e $S = 58,23 \times 10^{-6} m^2$, obtém-se que $R_{20} \simeq 7,50 m\Omega$ para a bobina da cavidade e $R_{20} \simeq 5,0 m\Omega$ para a bobina do canhão ou coletor.

Além de estimar a resistência da bobina da cavidade, é necessário também medir o valor desta resistência para confirmar o valor teórico obtido. Isto é de grande importância porque alguns miliohms a mais na resistência de cada bobina requerem mais potência da fonte de alimentação elétrica e do sistema de refrigeração, acarretando um aumento nos custos dos equipamentos. Quanto às bobinas do canhão ou coletor, não houve preocupação com relação a estas medidas, visto que os requisitos de potência para produzir os campos magnéticos nas regiões do canhão e coletor são bem menores.

Para medir a resistência da bobina da cavidade R_{20} na temperatura ambiente ($T = 20^\circ C$), utiliza-se uma ponte de "Wheatstone", conforme mostra a Figura 2.4.

Pode ser demonstrado que na condição de equilíbrio ($I = 0$), vale a seguinte relação :

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (2.3)$$

As medidas são feitas com uma determinada bobina em cinco configurações diferentes denominadas 1, 2, 3, 4 e 5, mostradas nas Figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 respectivamente.

A resistência total R_t é igual à soma da resistência de contato R_c com a resistência da bobina R_{20} , isto é, $R_t = R_c + R_{20}$.

Os casos 1 e 2 fornecem medidas com contatos normais (um fio é enrolado sobre o condutor de cobre com uma certa pressão) e os casos 3 e 5 com contatos a base de solda. No caso de contato normal, o efeito da condição de contato é grande. Porém, considerando-se que $R_t > R_c$, obtém-se que a resistência R_{20} pode ser da ordem de 9,65 m Ω .

Com o objetivo de diminuir o efeito da resistência de contato, os fios que conectam a bobina ao ramo R_4 da ponte são soldados sobre o fio de cobre da bobina. Os resultados do caso 3 são preliminares, em que é introduzido adicionalmente na resistência de contato um condutor de cobre de alta corrente. A partir dos casos 4 e 5, uma resistência da bobina $R_{20} \simeq 7,0$ m Ω pode ser obtida. Nesta medição, deve-se mencionar que a resistência de contato, incluindo a resistência dos condutores que conectam a bobina ao ramo R_4 da ponte, é maior do que a resistência da bobina R_{20} por um fator de 4 aproximadamente.

A partir dos casos 3 e 4, estima-se que a resistência de contato cabo-bobina é da ordem de 1 m Ω .

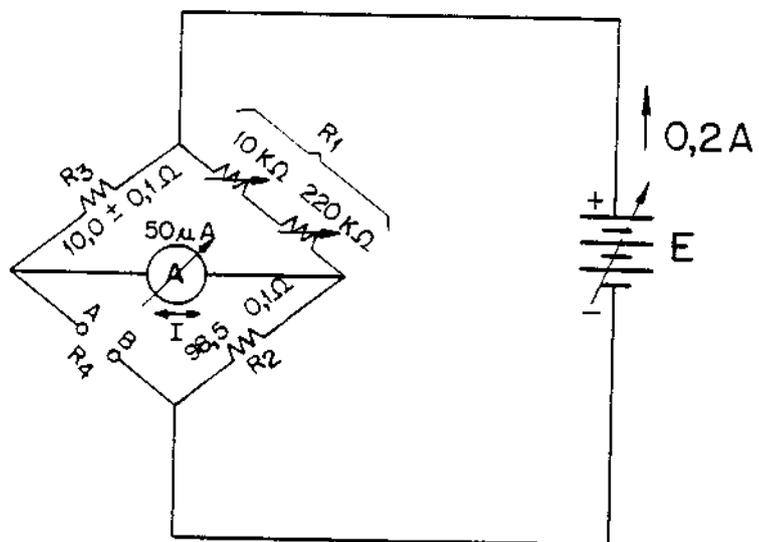


Fig. 2.4 - Ponte de "Wheatstone" para a medição de resistência R_{20} da bobina da cavidade.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	20,50	48,00
2	20,45	48,20
*3	15,60	63,10
4	19,00	51,80
5	19,15	51,40

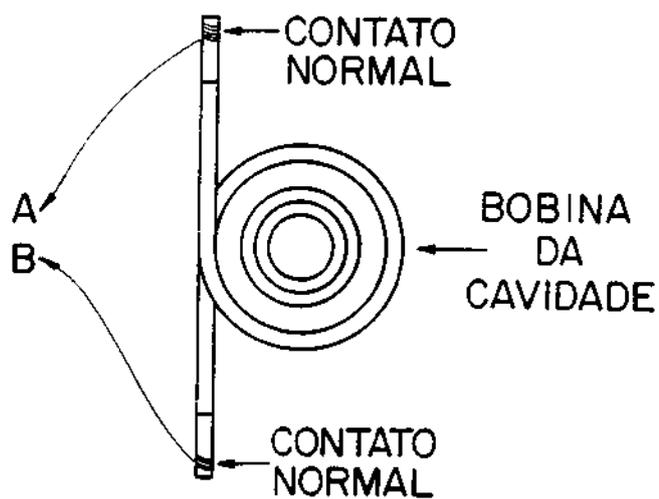


Fig. 2.5 - Caso 1: medição da resistência total com contato normal. M = número da medida. * - não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande. $\bar{R}_4 = [R_4(1) + R_4(2) + R_4(4) + R_4(5)]/4 \simeq 49,85 \text{ m}\Omega$.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	24,50	40,20
*2	18,35	53,70

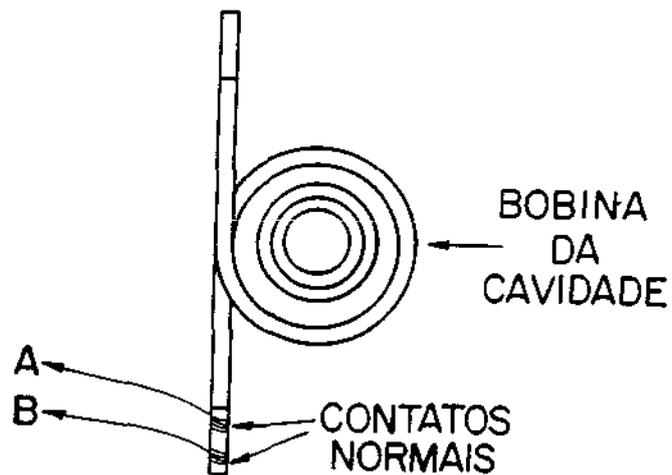


Fig. 2.6 - Caso 2: medição da resistência de contato normal. M = número da medida. * não considerar este valor, pois a resistência de contato pode ser grande.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	25,45	38,70

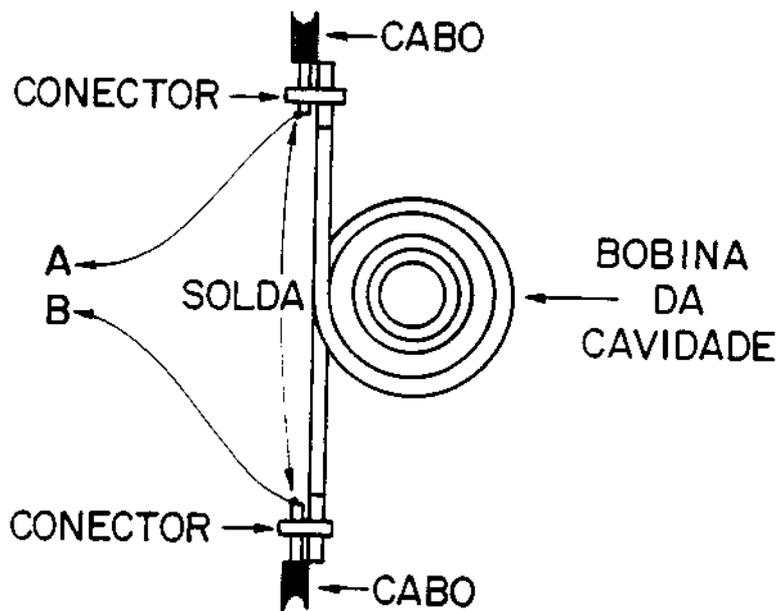


Fig. 2.7 - Caso 3: medição da resistência de contato de conector e de solda.
M = número da medida.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	26,15	37,70

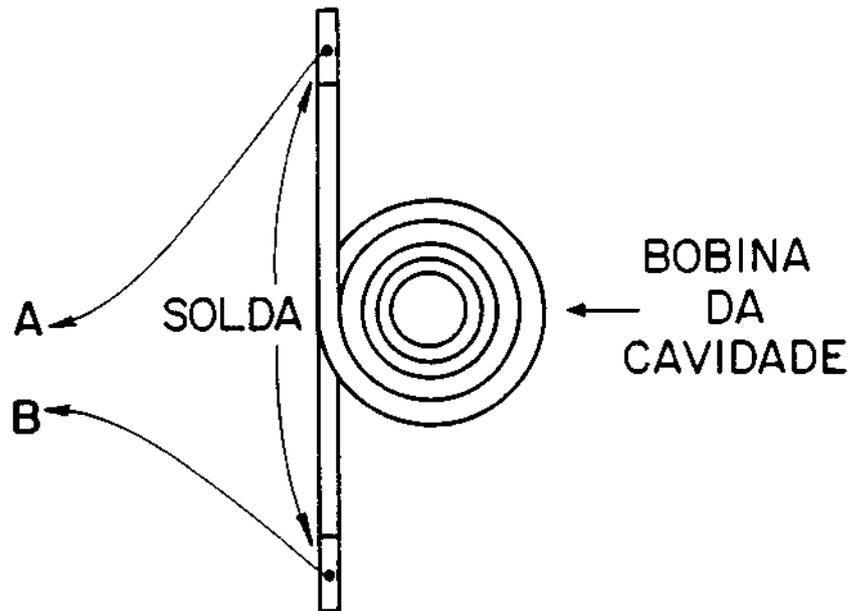


Fig. 2.8 - Caso 4: medição da resistência total com contato de solda.
M = número da medida.

M	$R_1(M)(k\Omega)$	$R_4(M)(m\Omega)$
1	32,10	30,70

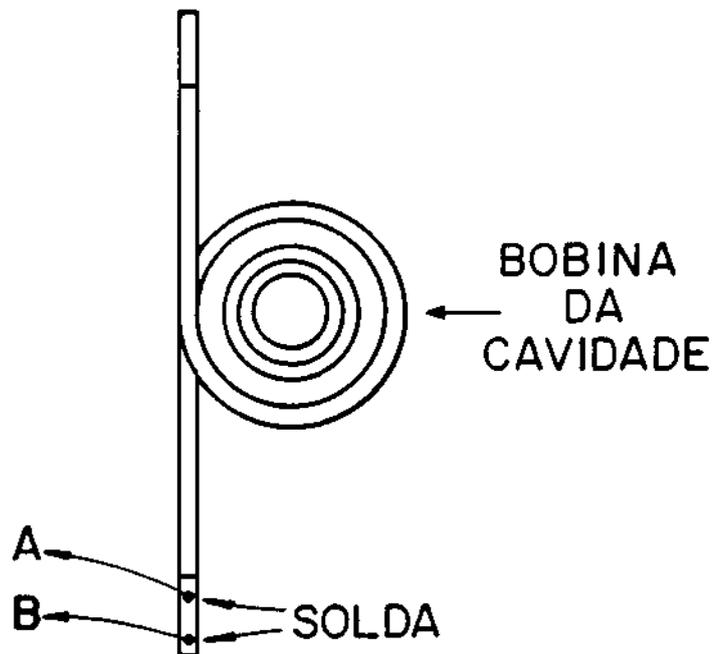


Fig. 2.9 - Caso 5: medição da resistência de contato de solda.
M = número da medida.

CAPÍTULO 3

CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS

A construção do sistema de bobinas magnéticas consiste na montagem do solenóide principal na região da cavidade ressonante e de dois solenóides auxiliares na região do canhão e do coletor, utilizando-se para isso uma estrutura de suporte, conforme mostra a fotografia do sistema na Figura 3.1.

Um esquema detalhado do girotron onde se pode observar o sistema de solenóides, está mostrado na Figura 3.2. Este esquema também inclui o sistema de vácuo e parte do sistema de refrigeração (distribuidores de água).

O solenóide principal é constituído de 20 bobinas da primeira espécie ($\phi_{int} = 100,0$ mm), enquanto que os solenóides do canhão e do coletor são compostos respectivamente por 10 e 4 bobinas da segunda espécie ($\phi_{int} = 250,0$ mm).

As bobinas do solenóide principal são ligadas eletricamente em série através de 4 tiras de cordoalhas estanhadas de cobre de 1" de largura. Para as bobinas dos solenóides do canhão e do coletor, utiliza-se também a ligação elétrica em série com apenas 2 cordoalhas de 1", pois neste caso as exigências de potência elétrica são menores. A resistência de contato bobina-cordoalha é muito pequena (< 1 m Ω).

As bobinas magnéticas são também refrigeradas a água devido às altas correntes envolvidas na produção do perfil axial de indução magnética de alta intensidade. Portanto, 20 circuitos paralelos de refrigeração são colocados entre dois distribuidores de água para retirar calor do solenóide principal (ver nas Figuras 3.1 e 3.2 os distribuidores na posição vertical). Para retirar o calor dos solenóides do canhão e do coletor, mais 14 circuitos paralelos de refrigeração são colocados entre outro par de distribuidores, sendo 10 circuitos usados para resfriar as bobinas do canhão e os 4 circuitos restantes para as bobinas do coletor (ver nas Figuras 3.1 e 3.2 os distribuidores na posição horizontal). Tubos de "poly-flo" com $\phi_{ext} = 1/4$ " fazem a ligação hidráulica entre os distribuidores de água e as bobinas magnéticas, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

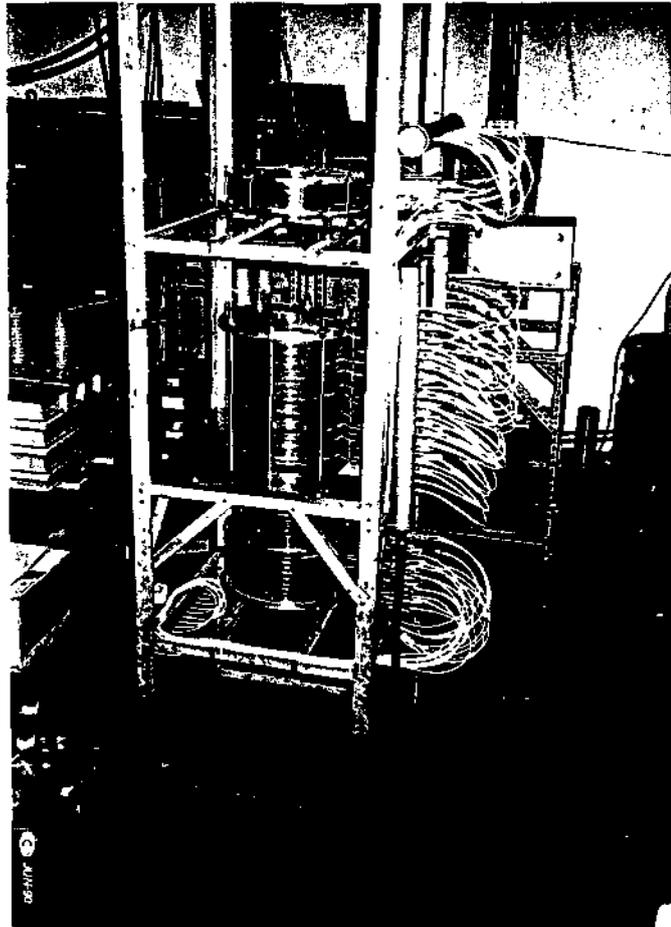


Fig. 3.1 - Fotografia do sistema de bobinas magnéticas, incluindo estrutura de suporte e distribuidores de água.

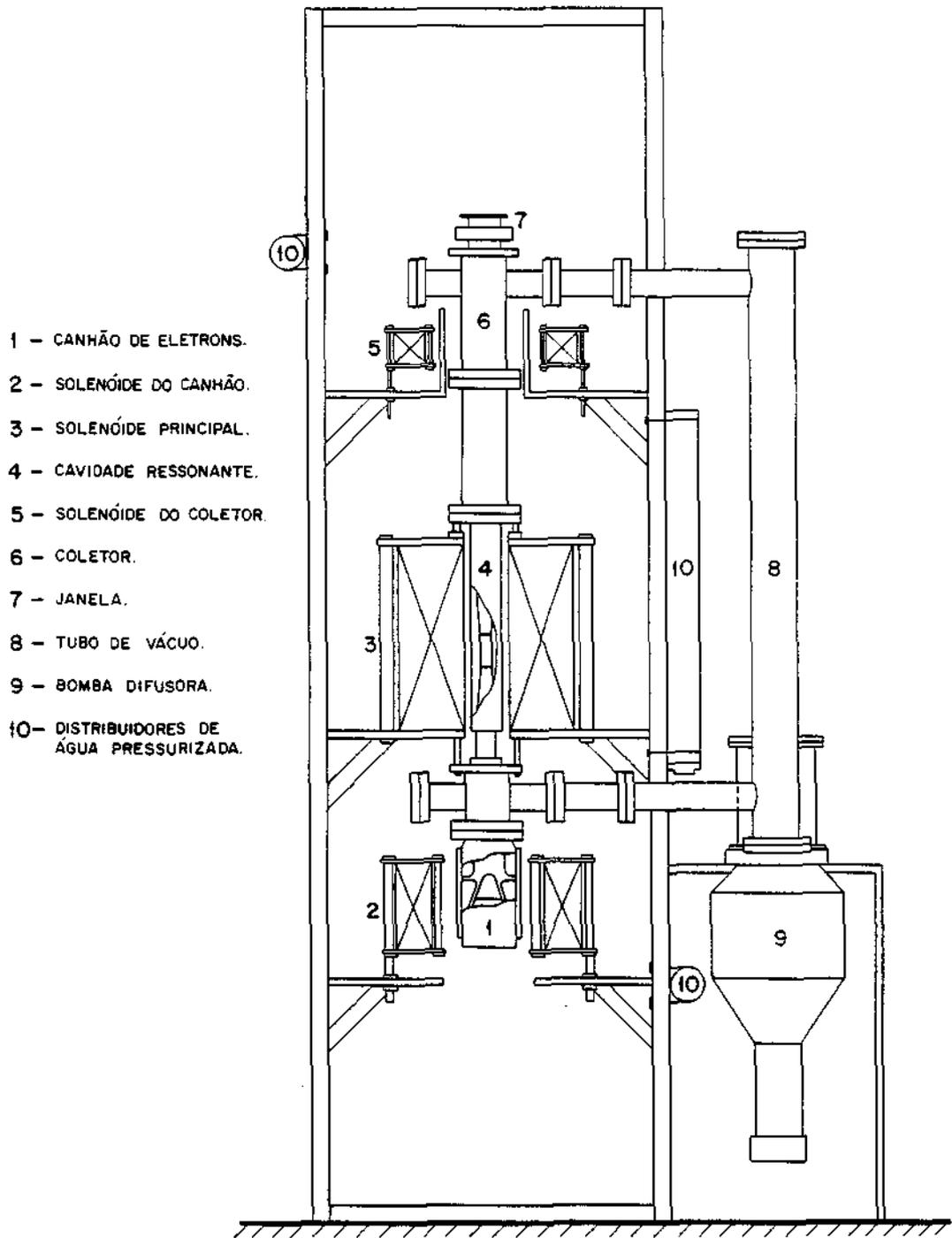


Fig. 3.2 - Esquema detalhado do girotron e estrutura de suporte.

CAPÍTULO 4

MAPEAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO

O projeto conceitual do girotron de 35 GHz do LAP/INPE requer um perfil axial de indução magnética com 3 patamares de campo (1,05 kG, 0,65 kG e 13,2 kG) respectivamente nas regiões do catodo, cavidade e coletor, conforme discutido anteriormente. O patamar de 13,2 kG na região da cavidade ressonante não deve variar muito, tanto no espaço quanto no tempo, devendo ficar restrito a um intervalo de 0,1% de flutuação máxima. Deve-se isto ao fato da condição de ressonância ciclotrônica depender do campo magnético (ver equações 1.1 e 1.2). Se o campo varia espacialmente ou temporalmente, o modo nominal (TE_{021}) de oscilação pode não apresentar estabilidade em frequência. Portanto, uma regulação de corrente menor do que 0,1% (fator de ondulação) é recomendável para a fonte de alimentação do solenóide principal, pois a flutuação de corrente está relacionada com a variação temporal do campo magnético. Em relação à variação no espaço uma perturbação espacial máxima de 0,1% também pode ser tolerada na região da cavidade.

Conseqüentemente, o trabalho de mapeamento consiste em levantar o perfil axial de indução magnética e medir a variação espacial do campo magnético na região da cavidade ressonante, com finalidade de verificar:

- 1) se o perfil axial experimental é compatível com o perfil calculado teoricamente;
- 2) se a variação relativa espacial do campo é inferior a 0,1%.

4.1 MEDIÇÃO DO PERFIL AXIAL DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

Um magnetômetro convencional (Gaussímetro) é usado para determinar o perfil axial de indução magnética. Uma sonda magnética axial do magnetômetro é deslocada verticalmente ao longo do eixo do sistema de solenóide para fazer a medição da intensidade de campo em uma determinada posição z . A Figura 4.1 mostra o sistema de medição utilizado, onde um sistema de polias e de molas possibilita o deslocamento da sonda, e uma escala graduada fornece a medida da posição axial z . A faixa emissora do canhão é tomada como a origem do sistema de referência ($z = 0$).

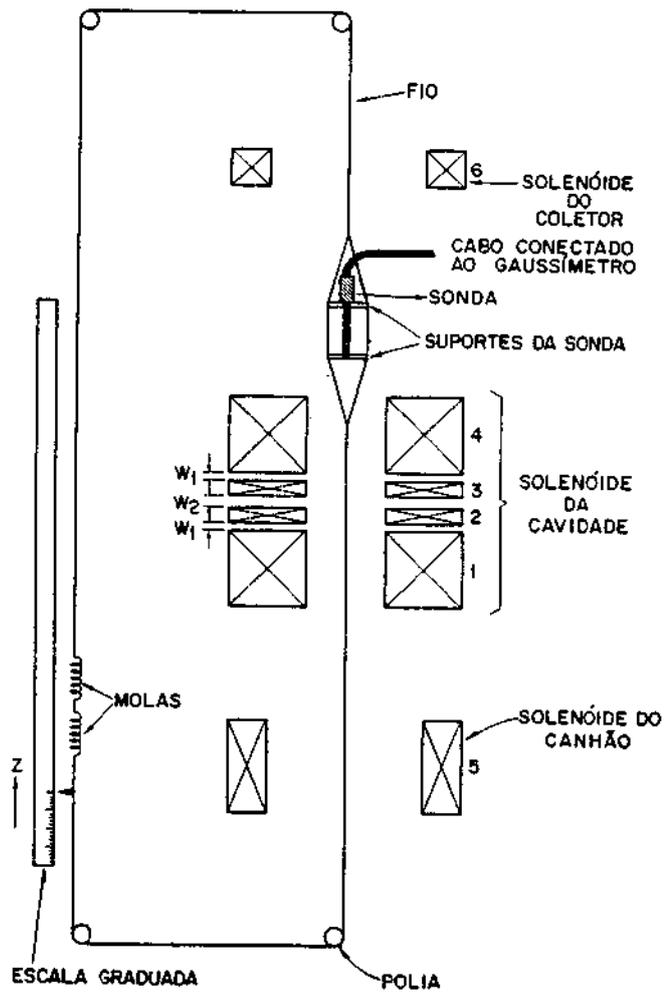


Fig. 4.1 - Sistema de medição do perfil axial de indução magnética.

Uma condição necessária para que a variação temporal não interfira na medição do perfil axial é que o fator de ondulação das fontes utilizadas seja de pequeno valor (de preferência menor do que 0,1%).

O perfil axial de indução magnética do sistema de bobinas magnéticas é composto pela superposição dos três campos produzidos pelos solenóides do canhão, cavidade e coletor. Dessa forma, é importante verificar se tais distribuições de campos magnéticos concordam com os perfis axiais calculados teoricamente. As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 mostram os perfis axiais, teórico e experimental, para cada um dos solenóides. Nestas figuras, observa-se a boa concordância entre os pontos experimentais e as curvas teóricas para os 3 solenóides. Estas curvas teóricas são obtidas a partir de uma expressão que calcula a intensidade do campo magnético no interior de um solenóide em função de uma posição axial ao longo do seu eixo (ver Apêndice A). Para não haver necessidade de refrigeração das bobinas magnéticas, as correntes I

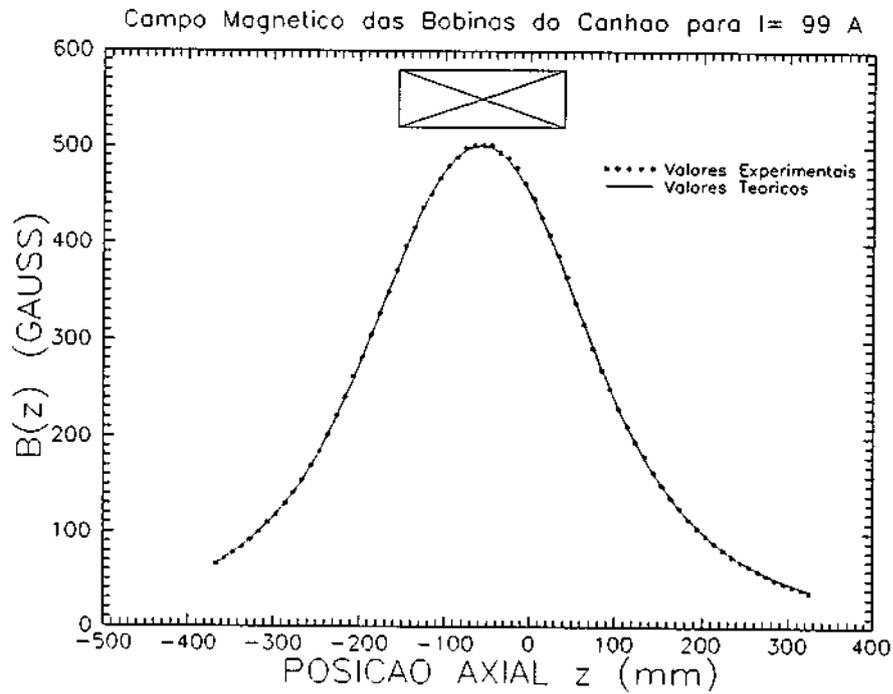


Fig. 4.2 - Perfil axial de indução magnética do solenóide do canhão.

nos solenóides durante a medição do perfil axial devem ser limitadas a baixos valores ($I < 100$ A). Durante esta fase de mapeamento, é importante saber que quando as correntes atingem altos valores, os “shunts” de medição podem sofrer alteração de resistência devido ao efeito ôhmico. Então, deve-se atentar aos valores medidos de corrente porque eles podem ser falsos.

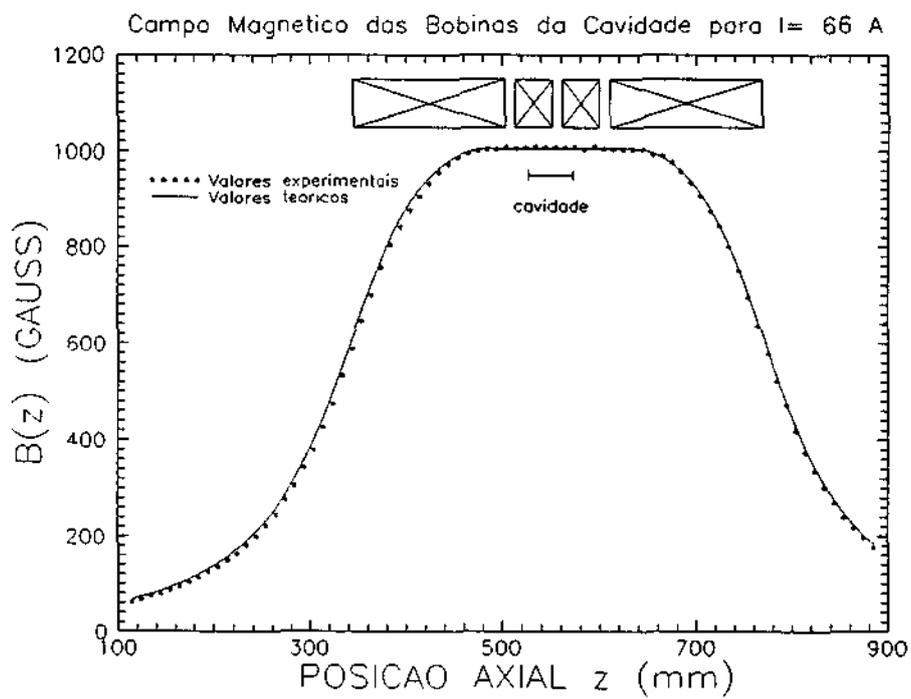


Fig. 4.3 - Perfil axial de indução magnética do solenóide principal.

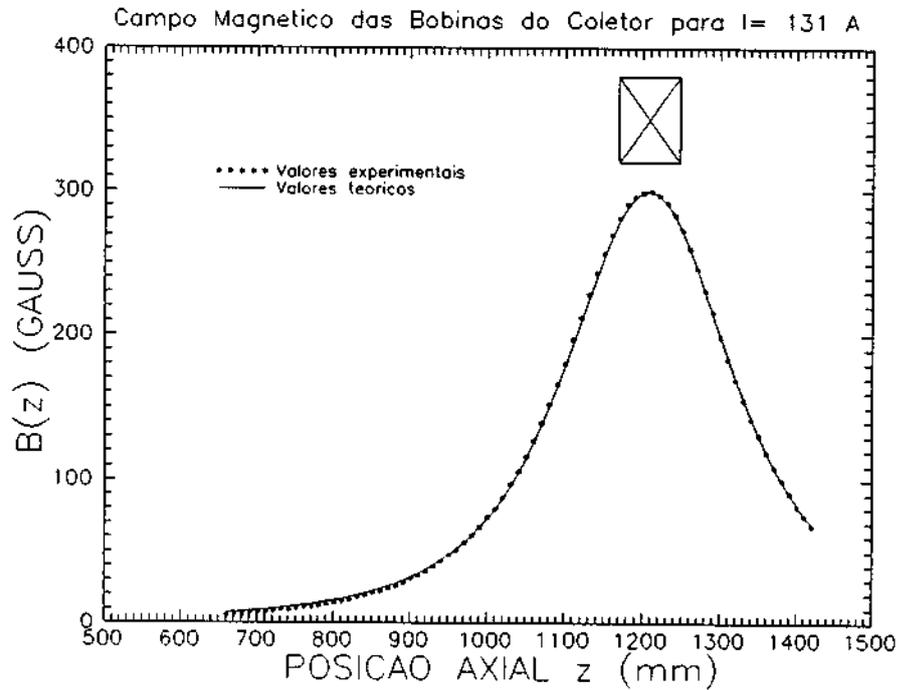


Fig. 4.4 - Perfil axial de indução magnética do solenóide do coletor.

Nas Figuras 4.1 e 4.3, os solenóides laterais do magneto da cavidade são compostos por 8 bobinas e os centrais por duas bobinas cada um, totalizando 20 bobinas. O espaçamento de 11 cm(w_1) entre os solenóides central e lateral e de 10 cm(w_2) entre os dois centrais é conseguido através do uso de separadores isolantes colocados entre as bobinas magnéticas da cavidade. Toda esta exigência de construção para o solenóide principal é importante para obtenção de um patamar de campo magnético com extensão maior do que 13 cm na região da cavidade. Na Figura 4.3, observa-se um patamar de campo de 20 cm aproximadamente. Neste caso, é preciso levar em consideração a contribuição de campo dos 4 solenóides do magneto principal para o cálculo do perfil axial teórico.

Para a medição do perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides, é necessário calcular as correntes em cada solenóide para a obtenção dos patamares de campo de 1,05 kG, 13,2 kG e 0,65 KG respectivamente nas regiões do canhão, cavidade e coletor. Entretanto, para não haver necessidade de refrigeração dos magnetos, admite-se um fator de redução de 10 para o campo magnético. Portanto, as correntes ficam também reduzidas pelo mesmo fator de 10, visto que a relação entre campo magnético e corrente é linear. Com este fator de redução no campo magnético, a análise do perfil axial não fica invalidada, pois o importante é a forma do perfil e não o valor do campo. Além disso, considera-se a contribuição de cada um dos 6 solenóides que compõem o sistema para cada ponto do perfil axial (lembrar que o magneto principal constitui-se de outros 4 solenóides). Dessa forma, pode-se montar o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{aligned} B(z_1) &= B_5(z_1, I_{can}) + B_1(z_1, I_{cav}) + B_2(z_1, I_{cav}) + \\ &+ B_3(z_1, I_{cav}) + B_4(z_1, I_{cav}) + B_6(z_1, I_{col}) = 105, \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} B(z_2) &= B_5(z_2, I_{can}) + B_1(z_2, I_{cav}) + B_2(z_2, I_{cav}) + \\ &+ B_3(z_2, I_{cav}) + B_4(z_2, I_{cav}) + B_6(z_2, I_{col}) = 1320, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} B(z_3) &= B_5(z_3, I_{can}) + B_1(z_3, I_{cav}) + B_2(z_3, I_{cav}) + \\ &+ B_3(z_3, I_{cav}) + B_4(z_3, I_{cav}) + B_6(z_3, I_{col}) = 65, \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde:

- $B(z)$ = campo magnético total;
- $B_5(z, I)$ = componente de campo magnético do solenóide do canhão;
- $B_1(z, I)$, $B_2(z, I)$, $B_3(z, I)$ e $B_4(z, I)$ = componentes de campo magnético do solenóide principal;
- $B_6(z, I)$ = componente de campo magnético do solenóide do coletor;
- $z = z_1$ = posição axial da faixa emissora;
- $z = z_2$ = posição axial do centro do solenóide da cavidade;

- $z = z_3 =$ posição axial do centro do solenóide do coletor;
- $I = I_{can} =$ corrente que flui pelas bobinas do canhão;
- $I = I_{cav} =$ corrente que flui pelas bobinas da cavidade;
- $I = I_{col} =$ corrente que flui pelas bobinas do coletor.

Como a faixa emissora é tomada como a origem do sistema de referência, obtém-se que $z_1 = 0$, $z_2 = 0,557$ m e $z_3 = 1,208$ m. Substituindo-se estes valores no sistema de equações lineares e utilizando-se a expressão do Apêndice A para o cálculo de B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 e B_6 , pode-se chegar aos valores das correntes dos solenóides: $I_{can} = 13,2$ A, $I_{cav} = 86,2$ A e $I_{col} = 16,2$ A.

A Figura 4.5 mostra os perfis axiais teórico e experimental de indução magnética do sistema de solenóides com um fator de redução de 10 e correntes nos magnetos do canhão, cavidade e coletor mantidas em 13,2 A, 86,2 A e 16,2 A respectivamente. Observa-se uma boa concordância entre os perfis axiais e teórico. Entretanto, o patamar de campo na região da cavidade ressonante é aproximadamente de 1400 G. Isto deve-se ao mascaramento do valor exato de corrente provocado pelas perdas ôhmicas no “shunt” de medição, pois a corrente no solenóide principal possui um valor relativamente alto ($I_{cav} \approx 100$ A). O ajuste da curva teórica com os pontos experimentais no gráfico é feito considerando-se que o valor exato medido da corrente do magneto da cavidade deve ser aproximadamente de 91,0 A (e não de 86,2 A). Os patamares de campo (obtidos na Figura 4.5) nas regiões do canhão e do coletor são respectivamente 105 G e 65 G. Estes valores de campo estão de acordo com os valores de projeto porque a corrente do solenóide principal possui uma influência menor sobre os campos dos outros dois magnetos devido às distâncias envolvidas e, além disso, a variação de corrente foi pequena.

Todos os gráficos das Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são obtidos através de um pacote gráfico de programas denominado GRAPHER. Este pacote permite criar arquivos onde são incluídos os pontos a serem mostrados no gráfico. Os pontos experimentais são obtidos através das medidas de campo magnéticos ao longo da posição axial z e os pontos teóricos através de programas desenvolvidos para o cálculo do campo magnético. No caso do solenóide da cavidade, o somatório das expressões para $B_1(z)$, $B_2(z)$, $B_3(z)$ e $B_4(z)$ é usado para o cálculo do campo magnético total. E para o caso do cálculo do campo magnético total do sistema de solenóides, o somatório utilizado contém as expressões para $B_1(z)$, $B_2(z)$, $B_3(z)$, $B_4(z)$, $B_5(z)$ e $B_6(z)$. O Apêndice B apresenta, como exemplo, o programa desenvolvido em linguagem “C” para o cálculo do perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides.

Perfil axial de inducao magnetica do girotron/LAP/INPE

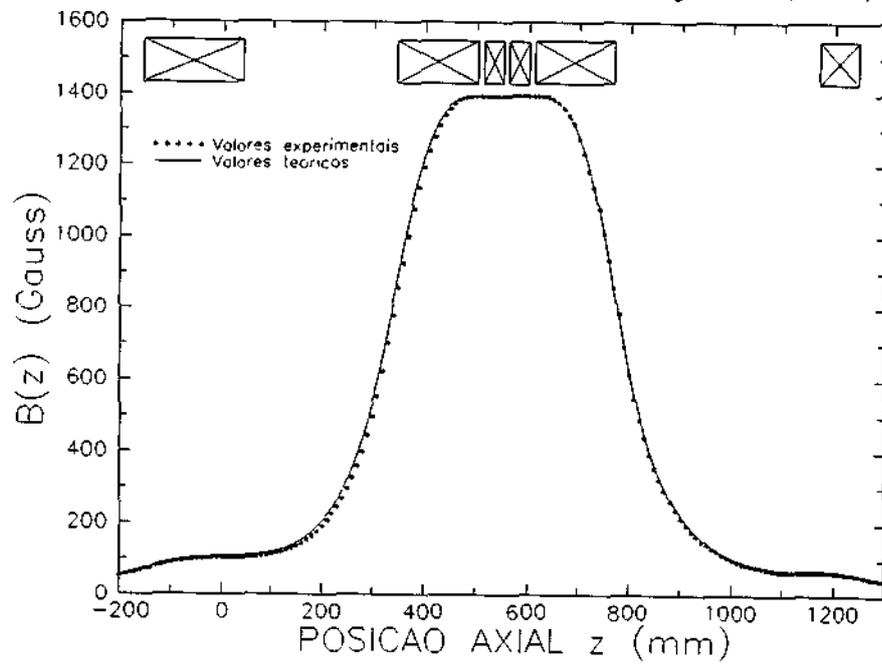


Fig. 4.5 - Perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides.

4.2 MEDIDA DA VARIAÇÃO ESPACIAL DO CAMPO MAGNÉTICO

A medida da variação espacial do campo magnético não pode ser feita pelos magnetômetros convencionais (Gaussímetros) com precisão menor do que 0,1%. Dessa maneira, desenvolveu-se um método alternativo que consiste na medida espacial da diferença de amplitude entre dois sinais, e_1 e e_2 , os quais são sinais de uma bobina de referência e de uma sonda magnética respectivamente. A Figura 4.6 ilustra o sistema de medida empregado.

O grupo de 20 bobinas do solenóide principal é alimentado com corrente a.c., frequência 60 Hz, para provocar o aparecimento das tensões induzidas e_1 e e_2 . A diferença entre estes dois sinais ($e_{s1} - e_{s2}$), com a bobina móvel no centro do magneto, é ajustada para ser nula. A corrente a.c. do magneto é fornecida por um transformador abaixador de tensão de 220 V/12,6 V e um autotransformador. A corrente no magneto é limitada a alguns amperes de corrente para não haver necessidade de refrigeração. Então, um campo magnético B_o de várias dezenas de gauss pode ser produzido no centro solenóide.

Para este sistema de medida, escolhe-se 5 voltas ($N_1 = 5$) de fio de cobre 14 AWG para a construção da bobina de referência e 2000 voltas ($N_2 = 2000$) com diâmetro $\phi = 64 \mu\text{m}$ para a construção da sonda magnética. Desta forma, obtém-se uma tensão induzida (e_1 ou e_2) da ordem de 15 mV para $B_o = 10 \text{ G}$. Como este sinal é de baixo valor, uma amplificação de 10 vezes é exigida. Isto é conseguido com o emprego do circuito amplificador e isolador com ganho $G = 10$, mostrado na Figura 4.7. Este circuito possui alta impedância de entrada ($Z_{in} > 1 \text{ M}\Omega$), baixa impedância de saída ($Z_{out} < 1 \Omega$) e a função de evitar interferência eletromagnética entre a sonda e a bobina de referência.

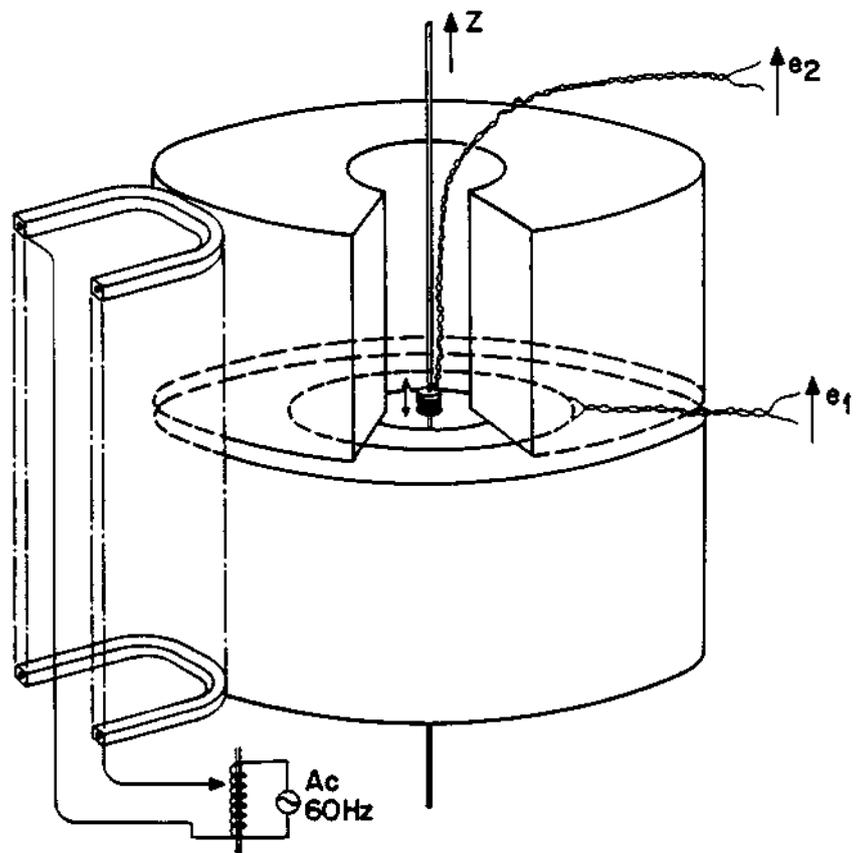


Fig. 4.6 - Sistema de medida da variação espacial do campo magnético; e_1 = tensão induzida na bobina de referência (bobina na seção média do magneto); e_2 = tensão induzida na sonda magnética (bobina móvel).

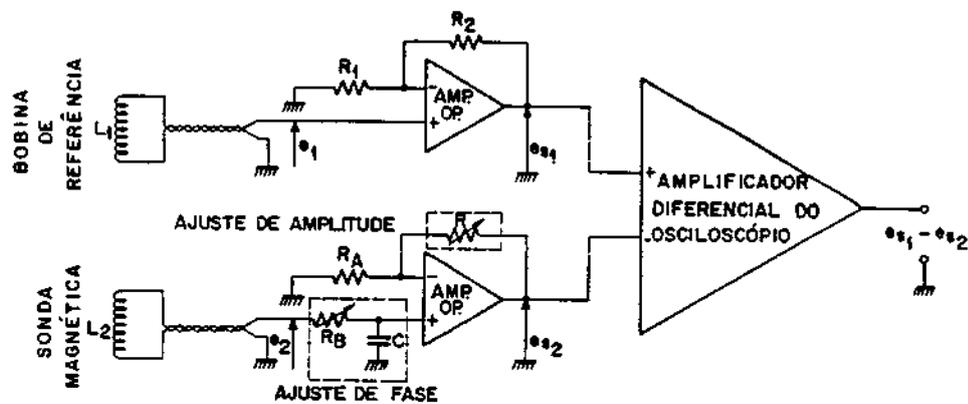


Fig. 4.7 - Circuito amplificador e isolador.

O sinal e_{s_2} é ajustado no circuito amplificador para que a diferença $e_{s_1} - e_{s_2}$ seja nula na saída do amplificador diferencial do osciloscópio. Desde que os dois sinais são senóides com a mesma frequência ($f = 60 \text{ Hz}$), a amplitude e a fase devem ser ajustadas. O primeiro ajuste é feito através do resistor variável R e o segundo ajuste através do potenciômetro R_B no circuito de compensação de fase. Através deste processo de cancelamento obtém-se uma precisão máxima de 0,01% ($< 0,1\%$).

A medida da variação espacial do campo magnético ($\Delta B/B$) inicia-se com o cancelamento dos sinais e_1 e e_2 , com a sonda colocada no centro do magneto. Variando-se a posição da sonda ao longo do eixo z , obtém-se um valor de tensão residual ($\Delta e = e_{s_1} - e_{s_2}$) para uma determinada posição axial, onde Δe pode ser medido através do amplificador diferencial do osciloscópio. Entretanto, antes de fazer qualquer medida, deve-se ajustar a fase da tensão residual com a fase da bobina de referência. A Figura 4.8 mostra a variação espacial do campo magnético obtida ao longo do eixo z do solenóide principal.

Através da Figura 4.8, conclui-se que os resultados obtidos fornecem uma variação do campo magnético menor do que 0,1% na região da cavidade.

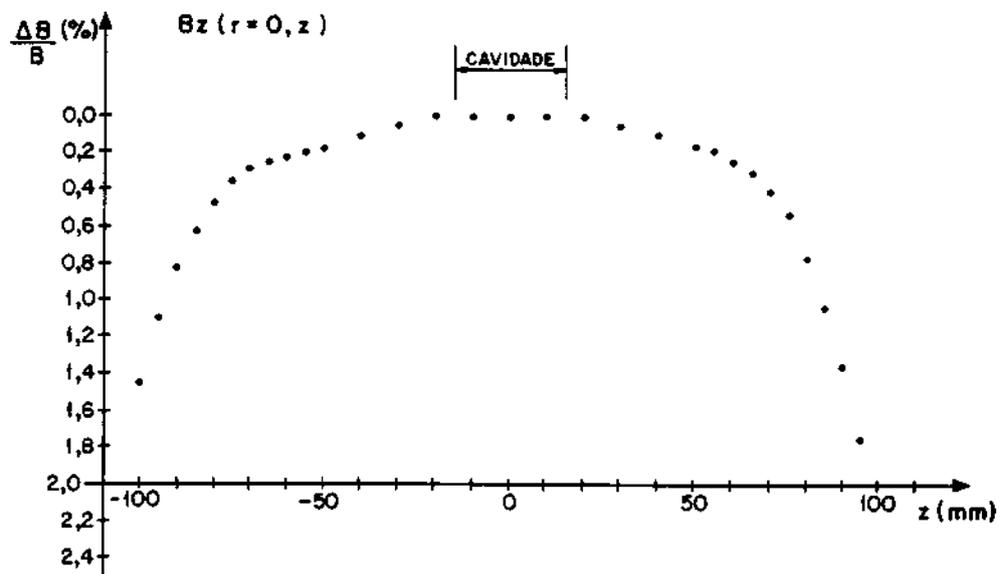


Fig. 4.8 - Variação espacial do campo magnético principal ao longo do eixo z . Origem $z = 0$ colocada no centro do magneto da cavidade.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar a construção e o mapeamento do campo magnético do sistema de solenóides do girotron. Este sistema é uma parte importante do girotron, porque a frequência do modo nominal de oscilação (TE_{021}) depende diretamente do campo magnético na região da cavidade ressonante.

Em termos construtivos, as bobinas são reforçadas com fibra de vidro embebida em resina “epoxy” para compensar as forças magnéticas de repulsão. Uma importante característica apresentada pelas bobinas magnéticas da cavidade é a resistência medida de $7,0\text{ m}\Omega$. Este valor concorda com o valor estimado de $7,5\text{ m}\Omega$ por bobina.

Com relação ao mapeamento do campo magnético, o perfil axial medido por um magnetômetro convencional é compatível com o perfil axial teórico obtido através de um programa desenvolvido em linguagem “C”. Este programa calcula o campo magnético total ao longo do eixo z do sistema de solenóides, levando em conta a contribuição de cada magneto. O perfil axial fornecido está com um fator de redução 10 para não haver necessidade de refrigeração dos magnetos. Entretanto, o patamar de campo obtido na região da cavidade ressonante está com um valor (1400 G) acima daquele esperado (1320 G). Isto pode ser explicado pelo efeito “Joule” ocorrido no “shunt” de medição que mascara o valor medido de corrente. Através do ajuste da curva teórica com os pontos experimentais, chega-se à conclusão de que a corrente é mantida em 91,0 A no solenóide principal e não em 86,2 A como desejado. Esta pequena elevação do valor de corrente é suficiente para elevar a altura do patamar de campo na região da cavidade para 1400 G. Porém, a menor influência do magneto principal nas regiões do canhão e do coletor não é suficiente para alterar significativamente os patamares de campo nestas regiões, que permanecem respectivamente em 105 G e 65 G.

A variação espacial do campo magnético medida na região do patamar da cavidade é menor do que 0,1%. Este valor medido está dentro das especificações de projeto. A medida da variação espacial é realizada através de um método alternativo que consiste na medida da diferença de amplitude entre dois sinais obtidos a partir de uma bobina de referência e de uma sonda magnética. Neste caso, não há possibilidade de fazer estas medidas com a ajuda de um magnetômetro convencional.

Finalmente, conclui-se que os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com aqueles esperados durante a fase do projeto do sistema de bobinas magnéticas do girotron de 35 GHz ora em construção no LAP/INPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Barroso, J.J.; Montes, A.; Ludwig, G.O.; Correa, R.A. Design of a 35 GHz gyrotron. **International Journal of Infrared Millimeter Waves**, 11 (2): 251-274, feb. 1990.
- (2) Montgomery, D.B. Solenoid magnet design. New York, **John Wiley & Sons**, 1969, p. 10.
- (3) Knoepfel, H. Pulsed high magnetic fields. Amsterdam, North-Holland, **Publishing Company**, 1970, p. 319.
- (4) Kernighan, B.W.; Ritchie, D.M. C: a linguagem de programação . Rio de Janeiro, **Editora Campus**, 1986, p. 140-143.

APÊNDICE A

CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO NO INTERIOR DE UM SOLENÓIDE ESPESSO

A Figura A.1 mostra uma vista da seção de corte de um solenóide espesso:

O cálculo do campo magnético (Knoepfel (3)) no interior do solenóide ao longo do seu eixo axial num ponto z pode ser dado pela expressão:

$$B(z') = \frac{\mu_o NI}{2h(b-a)} \left[z' \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + z'^2}}{a + \sqrt{a^2 + z'^2}} \right) + (h - z') \ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 + (h - z')^2}}{a + \sqrt{a^2 + (h - z')^2}} \right) \right], \quad (\text{A.1})$$

onde:

- N = número de espiras do solenóide;
- I = corrente em A que flui pelo solenóide;
- μ_o = permeabilidade magnética = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;
- z' = posição axial em m ;
- b = raio externo em m ;

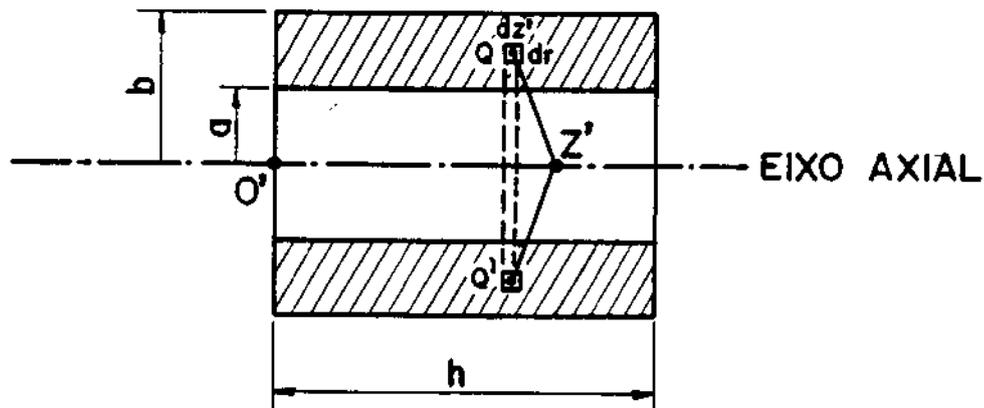


Fig. A.1 - Seção de corte de um solenóide espesso.

- a = raio interno em m ;
- h = comprimento do solenóide em m .

Na Equação (A.1), a origem O' do sistema de referência z' é colocada na borda esquerda do solenóide. Entretanto, na medição do perfil axial de indução magnética do sistema de solenóides a origem do sistema de referência z é considerada como sendo a faixa emissora do canhão. Portanto, deve-se processar a seguinte mudança de coordenadas para cada solenóide do sistema:

$$z' = z - K(\text{Cte}), \quad (\text{A.2})$$

onde:

- $K = -0,156$ para o solenóide do canhão;
- $K = 0,345$ para o 1º solenóide da cavidade;
- $K = 0,514$ para o 2º solenóide da cavidade;
- $K = 0,562$ para o 3º solenóide da cavidade;
- $K = 0,611$ para o 4º solenóide da cavidade;
- $K = 1,169$ para o solenóide do coletor.

APÊNDICE B

PROGRAMA DE CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO DO SISTEMA DE SOLENÓIDES

Este programa calcula o valor do campo magnético em qualquer posição axial z ao longo do eixo do sistema de solenóides, levando em conta os componentes de campo dos 6 magnetos. Este programa está escrito em linguagem "C" porque os padrões de escrita do "C" no arquivo gerado é mais simples e consome um tempo menor de processamento em relação a outras linguagens como, por exemplo, FORTRAN. Maiores esclarecimentos sobre a linguagem "C" podem ser obtidos em Kernighan (4).

A 1ª parte do programa consiste nas declarações de todas variáveis usadas e do apontador de arquivo, pois isto é um requisito básico desta linguagem. A declaração do apontador de arquivo é dada por "FILE *fp".

A 2ª parte consiste na abertura do arquivo (CMAG.DAT) para a gravação dos dados. A chamada do arquivo é dada por "fp=fopen (name, mode)", onde "name" é o nome do arquivo e "mode" são os modos permitidos como: leitura (r), gravação (w) e adição (a).

A 3ª parte do programa contém o cálculo do campo magnético, havendo primeiro uma mudança de coordenadas (ver Apêndice A) e, depois, o somatório das contribuições de campo de cada solenóide (B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5 e B_6) para fornecer o campo total BT .

Finalmente, a última parte consiste no fechamento do arquivo utilizado, através da instrução "fclose", e na subrotina "float B". Esta subrotina é usada para o cálculo do campo de cada solenóide durante a 3ª parte do programa.

A listagem do programa é dada logo a seguir.

```

#include <stdio.h>;
#include <stdlib.h>;
#include <conio.h>;
#include <math.h>;

float B();
float pi,uo;

main()
{
float a1=0.050,a2=0.125,b=0.203;
float x,z1,z2,z3,z4,z5,z6;
float B1,B2,B3,B4,B5,B6,BT;
FILE *fp;
pi=4*atan(1);
uo=4*pi*1.0e-7;
system("DEL A:CMAG4.DAT");
if((fp=fopen("A:CMAG4.DAT","w"))==NULL)
{
printf("\n nao consegue acessar arquivo\n");
exit(1);
}
for(x=-250.0;x<=1500.0;x=x + 10.0)
{
z1 = (x-345.0) / 1000.0;
z2 = (x-514.0) / 1000.0;
z3 = (x-562.0) / 1000.0;
z4 = (x-611.0) / 1000.0;
z5 = (x+156.0) / 1000.0;
z6 = (x-1169.0) / 1000.0;
B1 = B(z1,256,a1,b,0.158,91.0);
B2 = B(z2,64,a1,b,0.038,91.0);
B3 = B(z3,64,a1,b,0.038,91.0);
B4 = B(z4,256,a1,b,0.158,91.0);
B5 = B(z5,160,a2,b,0.196,13.2);
B6 = B(z6,64,a2,b,0.078,16.2);
BT = B1+B2+B3+B4+B5+B6;
BT = BT*1.0e4;
fprintf(fp,"%5.2f %5.2f\n",x,BT);
printf("%5.2f %5.2f\n",x,BT);
}
fclose(fp);
printf("\n Arquivo gravado \n");
}

float B(z,N,a,b,h,i) /*calculo do campo magnetico*/
float z,a,b,h,i;
int N;
{
float y,delta,gamma;

delta = z * log((b + sqrt(pow(b,2) + pow(z,2))) / (a + sqrt(pow(a,2)
pow(z,2)))));
gamma = (h - z) * log((b + sqrt(pow(b,2) + pow((h - z),2))) / (a +
sqrt(pow(a,2) + pow((h - z),2))));
y = uo * N * i / (2 * h * (b - a)) * (delta + gamma);

return(y);
}

```



AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

TÍTULO					
CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE BOBINAS MAGNÉTICAS DE 13 KG					
AUTOR					
J.O.Rossi; Y.Aso; P.J.Castro; J.J.Barroso; G.O.Ludwig; A.Montes; M.C.A.Nono; R.A.					
TRADUTOR					
Correc.					
EDITOR					
ORIGEM LAP	PROJETO PRAD	SÉRIE	Nº DE PÁGINAS 39	Nº DE FOTOS	Nº DE MAPAS
TIPO					
<input type="checkbox"/> RPQ	<input type="checkbox"/> PRE	<input type="checkbox"/> NTC	<input checked="" type="checkbox"/> PRP	<input type="checkbox"/> MAN	<input type="checkbox"/> PUD
DIVULGAÇÃO					
<input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA	<input type="checkbox"/> INTERNA	<input type="checkbox"/> RESERVADA	<input type="checkbox"/> LISTA DE DISTRIBUIÇÃO ANEXA		
PERIÓDICO/EVENTO					
CONVÊNIO					
AUTORIZAÇÃO PRELIMINAR					
22 / 08 / 91		 ASSINATURA Gerson Otto Ludwig Chefe do Laboratório Associado do Plasma			
REVISÃO TÉCNICA					
<input type="checkbox"/> SOLICITADA	<input checked="" type="checkbox"/> DISPENSADA				
ASSINATURA					
RECEBIDA ___/___/___ DEVOLVIDA ___/___/___					
ASSINATURA DO REVISOR					
REVISÃO DE LINGUAGEM					
<input type="checkbox"/> SOLICITADA	<input checked="" type="checkbox"/> DISPENSADA				
ASSINATURA					
Nº _____					
RECEBIDA ___/___/___ DEVOLVIDA ___/___/___					
ASSINATURA DO REVISOR					
PROCESSAMENTO/DATILOGRAFIA					
RECEBIDA ___/___/___ DEVOLVIDA ___/___/___					
ASSINATURA					
REVISÃO TIPOGRÁFICA					
RECEBIDA ___/___/___ DEVOLVIDA ___/___/___					
ASSINATURA					
AUTORIZAÇÃO FINAL					
___/___/___		 Lutz Alberto Vieira Dias ASSINATURA Centro de Tecnologias Associadas - CTE			
PALAVRAS-CHAVE					
Girotron		Centro de Tecnologias Associadas - CTE			
Bobinas Magnéticas		VEN 109			

038.9