

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PUBLICAÇÕES

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498 SÃO PAULO - SP
BRASIL

IFUSP/P-953

CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SONDAS
MAGNÉTICAS POLOIDAIS E TOROIDAIS DO TBR-1

Mauro S.T. Araújo e Álvaro Vannucci
Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Novembro/1991

CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SONDAS MAGNÉTICAS

POLOIDAIS E TOROIDAIS DO TBR-1

Mauro S. T. Araújo, Alvaro Vannucci

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

C.P. 20516, 01498 São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Neste trabalho será descrito a construção de um sistema de 16 bobinas poloidais de Mirnov, bem como 4 sondas toroidais e seus respectivos suportes mecânicos. Será apresentado o método utilizado na calibração destas sondas. Os resultados então obtidos, incluindo-se também a calibração de um outro sistema de 10 bobinas poloidais, serão mostrados.

1 - SONDAS MAGNÉTICAS NO TBR-1

O TBR-1 do IFUSP é um tokamak de pequeno porte, com razão de aspecto aproximadamente 3,8. Dentre os sistemas de diagnósticos que nele se encontram implantados, o conjunto de bobinas magnéticas, capazes de detectar as flutuações do campo magnético poloidal, é um dos mais apropriados à investigação de instabilidades que surgem durante o confinamento [1,2].

Históricamente, dois conjuntos de bobinas magnéticas tem sido utilizados como diagnósticos no TBR-1. O primeiro contendo 10 bobinas para captação do fluxo radial do campo magnético e outras 10 para o fluxo poloidal [3]. O segundo sistema é constituído por 16 bobinas angularmente equidistantes, todas voltadas à detecção do fluxo poloidal [2]. Além destas, 4 sondas toroidais separadas de $\pi/2$, uma das outras, também podem ser utilizadas.

2 - SONDAS MAGNÉTICAS POLOIDAIS

Recentemente, o segundo sistema de sondas magnéticas de Mirnov, constituído de 16 espiras, foi reconstruído. Na confecção das 16 bobinas utilizou-se o fio AWG 33 esmaltado, tendo como suporte um tubo de nylon de 6.35 mm de diâmetro. Cada enrolamento constituiu-se de duas camadas de 30 voltas cada e com helicidade oposta, o que permitiu efetuar uma blindagem de ruídos eletromagnéticos e obter uma maior precisão da sua localização angular.

Os enrolamentos foram inicialmente fixados com cola sobre o tubo de nylon, tendo suas extremidades trançadas e presas em direção a uma das extremidades. Todo o sistema foi então recoberto com plástico termo-retrátil e inserido em um tubo de aço inoxidável em forma de "foice", formado por dois tubos soldados entre si por uma das extremidades. Um deles é reto com comprimento de 28 cm, diâmetro externo de 1 cm e espessura de 0.12 cm. O outro tubo é recurvado na forma de uma semi-circunferência de raio 9.5 cm, possuindo espessura de 0.2 mm. Para o conjunto, foi verificado experimentalmente uma atenuação do campo que o penetra da ordem de

10%.

No interior do tubo recurvado é que são colocadas as bobinas magnéticas, sendo 8 delas em cada "foice", de forma que, ao serem introduzidas no interior do vaso do TBR-1, a separação entre uma bobina e outra é mantida constante, preservando a simetria poloidal. A estrutura final do sistema de sondas com o sistema de refrigeração a ar, correspondente, pode ser visto na figura 1.

3 - SONDAS MAGNÉTICAS TOROIDAIS

Embora denominadas toroidais, estas sondas captam também a variação do fluxo poloidal de campo magnético, e o nome ("toroidais") deve-se apenas ao fato de estarem dispostas ao longo de posições toroidais diferentes, de forma a permitirem a obtenção do número de onda n através do método de correlação de fases.

Recentemente, um novo arranjo para as 4 sondas toroidais foi idealizado. Na reconstrução das espiras, um carretel retangular de fibra de vidro com 7 mm de comprimento, 2.5 mm de largura e 3 mm de altura foi utilizado como suporte. Para cada uma delas, foram enroladas 50 voltas de fio esmaltado AWG 39, cujo diâmetro era de apenas 0.09 mm e requereu cuidados especiais no seu manuseio. As sondas foram coladas na extremidade de um tubo de latão, com os fios terminais entrelaçados e passados pelo seu interior, sendo posteriormente recobertos com um papel alumínio para efetuar a blindagem de campos elétricos.

A sonda com seu suporte de latão, figura 2, foi inserida num tubo de alumina e por fim colocada num dispositivo mecânico, figura 3, onde se podia ajustar, através de uma manopla, a sua

posição angular em relação ao campo poloidal e minimizar o fluxo do campo toroidal.

4.- CALIBRAÇÃO DAS BOBINAS POLOIDAIS E TOROIDAIS

A calibração das diversas bobinas magnéticas consistiu em se determinar a sensibilidade de cada uma, de forma que se conhecesse a sua resposta à variação temporal de um fluxo magnético que atravessa a área delimitada pelos enrolamentos que as compõem.

No método utilizado para essa calibração procurou-se reproduzir a situação a que são submetidas durante as descargas do TBR-1, ou seja, utilizou-se um arranjo que permitia expor as sondas a um campo magnético com frequência e amplitude de oscilação mais ou menos semelhantes às encontradas nas condições reais de laboratório. Neste sentido, foi aplicado um campo que oscilava com frequência entre 5 kHz e 160 kHz, com amplitude da ordem de 1 G. Este intervalo de frequência e essa amplitude foram escolhidos uma vez que englobam a amplitude e a faixa de frequência típicas das oscilações de Mirnov que surgem nas descargas do TBR-1 [1,2,4]. Considerando-se, por exemplo, um pulso de 8 kA e as sondas situadas na posição $r = 9.5$ cm, obtem-se pela aplicação da Lei Circuital de Ampere:

$$B_{\theta}(r) = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi r} \quad (1)$$

o seguinte valor para o campo magnético:

$$B_{\theta}(9.5) = 168 \text{ G}$$

ou seja, da ordem de 1% do campo poloidal de equilíbrio.

4.1 - A BOBINA DE HELMHOLTZ

O campo magnético com as características desejadas para a calibração era produzido por uma bobina de Helmholtz formada por dois solenoides paralelos capazes de criar um campo espacialmente uniforme nas proximidades do ponto médio entre eles. Neste ponto em particular, o campo magnético gerado é dado por [5,6]:

$$B_h = \frac{32 \cdot \pi \cdot N_h}{5^{3/2} a} \cdot \frac{I}{10} \quad (2)$$

onde I é a corrente que percorre os fios do solenoide, em amperes, e B_h é o campo induzido em gauss, "a" é o raio dos solenoides e N_h é o número de espiras de cada um deles.

Na figura 4 pode-se observar uma bobina de Helmholtz em corte.

A bobina de Helmholtz utilizada possuía os seguintes parâmetros [5]:

$$a = 3 \text{ cm}$$

$$N_h = 39 \text{ espiras}$$

Fornecendo então:

$$B_h = 11,69 \times 10^{-4} \times I \quad (3)$$

Assim, uma corrente de 85 mA circulando a bobina de Helmholtz foi suficiente para que se criasse um campo com amplitudes da ordem de 1G.

O circuito eletrônico associado às medidas de calibração foi projetado de forma a manter uma corrente constante na bobina de

Helmholtz e produzir, conseqüentemente um campo constante, que passava a variar devido a uma oscilação proveniente de um gerador de frequências acoplado ao circuito. O sistema completo, conforme mostrado na figura 5, era ligado numa fonte de tensão contínua e permitia através de um "trimpot" o ajuste do nível DC. Como a corrente que percorre a bobina de Helmholtz é igual à que circula pela resistência de 180 Ω , o "trimpot" foi ajustado para que uma corrente de 80 mA percorresse a bobina, gerando assim um nível DC no campo magnético, de acordo com a equação (3), de proximadamente 1 G.

O ajuste final da amplitude da oscilação foi feito diretamente no gerador de frequências, o qual permitiu obter uma tensão de 6 V pico a pico nos terminais da resistência de 68 Ω do circuito. Através do gerador foram também escolhidas a forma dos pulsos (senoidal) e as frequências aplicadas no sistema, segundo a expressão:

$$V(t) = V_0 \times \text{sen}(wt) \quad (4)$$

Nos terminais da resistência de 68 Ω a variação da tensão em função da corrente era dada por:

$$V(t) = 68 \times I(t)$$

Portanto, utilizando a equação (3) obtém-se:

$$B_h = 11,69 \times 10^{-4} \frac{V_0}{68} \text{sen}(wt) \quad (5)$$

Supondo-se que o sinal captado pelas sondas de Mirnov corresponde à variação temporal do fluxo magnético dado por:

$$\Phi = N A B = S B \quad (6)$$

onde:

N = número de espiras de cada sonda.

A = área de cada sonda.

S = Sensibilidade

tem-se, então, que a tensão induzida na sonda é dada por:

$$V_b = \frac{d\Phi}{dt} = S \frac{dB}{dt} = 6,48 \times 10^{-4} S f \quad (7)$$

Com esta relação obteve-se finalmente a sensibilidade S de cada sonda, ajustando-se uma reta pela função $V_b(f)$, uma vez que a sua inclinação, a menos da constante multiplicativa, corresponde ao valor procurado de S. O ajuste das retas foi feito utilizando-se um programa do computador PDP-11, denominado AJU, para o qual foi considerado tanto os desvios na tensão induzida nas sondas, como na frequência. Uma destas curvas de calibração é mostrada na figura 6.

4.2 - RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DAS SONDAS

Os resultados da calibração, tanto dos dois sistemas de bobinas poloidais quanto das 4 sondas toroidais de Mirnov, podem ser encontrados nas tabelas fornecidas a seguir.

TABELA 1	
Sistema de Bobinas Poloidais 1	
Bobina	Sensibilidade (Área Efetiva)
N°	(S ± 0.08) × 10 ⁻³ m ²
1	4,51
2	5,13
3	4,97
4	4,66
5	5,11
6	5,12
7	4,85
8	4,74
9	5,31
10	5,10

TABELA 2	
Sistema de Bobinas Poloidais 2	
Bobina	Sensibilidade (Área Efetiva)
N°	(S ± 0.03) × 10 ⁻³ m ²
1	2,08
2	2,14
3	2,19
4	2,19
5	2,17
6	2,18
7	2,17
8	1,89
9	1,96
10	2,11
11	2,09
12	2,13
13	2,02
14	2,11
15	2,09
16	2,15

TABELA 3	
Bobinas Toroidais de Mirnov	
Bobina	Sensibilidade (Área Efetiva)
N°	(S ± 0.14) × 10 ⁻⁴ m ²
1	6,82
2	7,72
3	7,03
4	7,40

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - A. Vannucci; "Instabilidades de Disruptura no TBR-1", Tese de Doutorado, IFUSP, 1987.
- [2] - H. T. Ing; "Oscilações MHD no TBR-1", Tese de Mestrado, IFUSP, 1984.
- [3] - M. E. Conde; "Determinação da Seção Transversal da Coluna de Plasma no Tokamak TBR-1", Tese de Mestrado, IFUSP, 1986.
- [4] - I. L. Caldas e outros; "Resonant Helical Fields in TBR-1", Publicação IFUSP/P - 654; Agosto 1987.
- [5] - J. L. Ferreira; "Diagnóstico de Plasma Toroidal com Sondas Magnéticas", IFUSP, 1980.
- [6] - Reitz-Milford; "Foundations of Eletromagnetic Theory", Addison-Wesley Publishing Company, 1974.

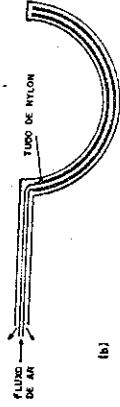
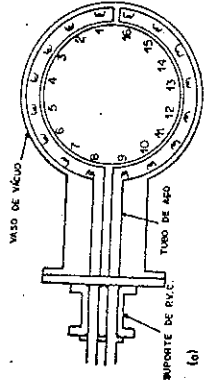


Fig. 1 - (a) Estrutura Mecânica das Bobinas Poloidais
(b) Esquema do Sistema de Refrigeração

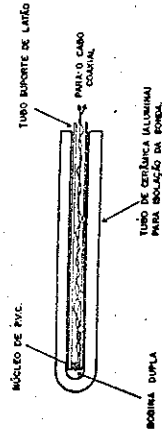


Fig. 2 - Esquema do Sonda Magnética Toroidal.

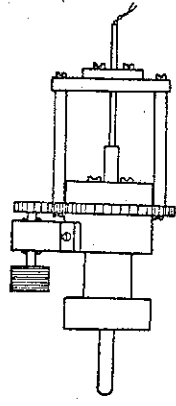


Fig. 3 - Esquema do Suporte de Sonda Toroidal.

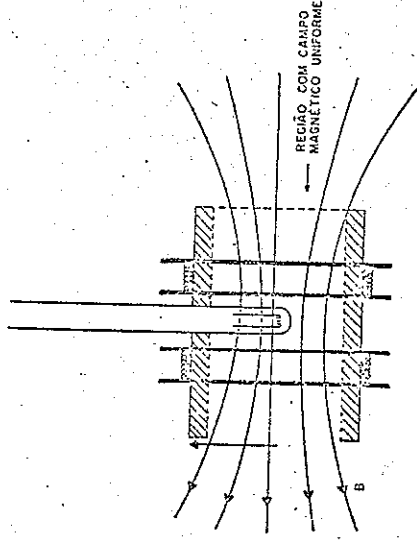


Fig. 4 - Bobina de Helmholtz.

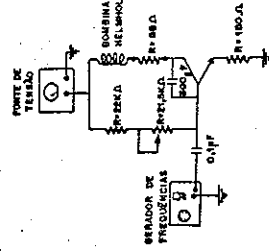


Fig. 5 - Esquema do Circuito Eletrônico.

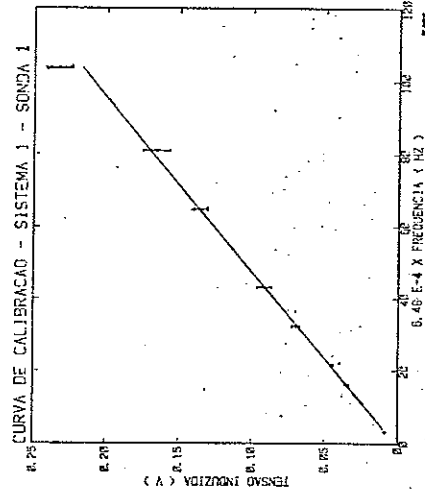


Fig. 6 - Retã Ajustada Sobre os Pontos Experimentais de Calibração e as Respetivas Barras de Erro.