

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498-970 SÃO PAULO - SP
BRASIL

PUBLICAÇÕES

IFUSP/P-1055

CONSTRUÇÃO DOS ANÉIS DO LIMITADOR
ERGÓDICO E MAGNÉTICO DO TOKAMAK TBR-1

Mauro Sérgio T. Araújo

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Junho/1993

CONSTRUÇÃO DOS ANÉIS DO LIMITADOR ERGÓDICO MAGNÉTICO DO TOKAMAK TBR-1

Mauro Sérgio T. Araújo

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
C.P. 20.516, CEP 05508-900 - São Paulo, S.P., Brasil

RESUMO

Foi construído e instalado sobre o vaso do tokamak TBR-1 um sistema composto por quatro anéis poloidais para atuarem como Limitador Ergódico Magnético (L.E.M.). Sua construção foi feita levando-se em conta uma distribuição angular dos seguimentos de corrente que incorpora efeitos toroidais inerentes a um tokamak, de maneira a se obter um campo de perturbação externo capaz de atuar preferencialmente na região de borda da coluna de plasma, através de ressonância com a superfície racional situada em $q = 7/2$, sendo necessário para isto que os quatro anéis sejam ligados com polarização conveniente. Também mapeou-se as componentes do campo magnético gerado por um destes anéis, em posições que simulavam algumas superfícies magnéticas do plasma, efetuando-se então uma decomposição em série de Fourier para se determinar a composição de modos presentes nestes campos nas diferentes superfícies escolhidas.

1 - INTRODUÇÃO

Dentre as possíveis aplicações dos limitadores ergódicos magnéticos (L.E.M.) em tokamaks, destaca-se a sua utilização como um dispositivo capaz de auxiliar no controle do transporte de partículas e energia, através da criação de perturbações magnéticas ressonantes com as superfícies racionais presentes na borda da coluna de plasma, produzindo ali uma região estocástica /1/.

Como resultado da ergodização da região periférica da coluna espera-se que o centro do plasma passe a ser envolvido por uma camada mais fria e de maior densidade, em decorrência do aumento da reciclagem de hidrogênio, proporcionando uma diminuição na interação entre o plasma e a parede, uma redução no nível de impurezas /2,3,4/ e alterações no potencial de plasma /5/.

Da mesma forma, a implantação de um Limitador Ergódico Magnético ao redor do vaso do tokamak TBR-1 tem como objetivo estudar sua influência sobre alguns parâmetros na borda da coluna de plasma, como temperatura e densidade, verificar alterações provocadas nos processos de transporte de partículas e de energia, servindo ainda como importante ferramenta nas pesquisas dos processos relacionados ao surgimento e desenvolvimento de instabilidades de ruptura, ao lado dos enrolamentos condutores que geram os Campos Helicoidais Ressonantes, uma vez que ambos causam profundas mudanças na topologia magnética do plasma.

Desta forma, será possível verificar se a sua aplicação ocasiona alguma melhoria na qualidade do confinamento do plasma do tokamak TBR-1, o que poderá ser constatado com a utilização dos diagnósticos disponíveis para o monitoramento de algumas grandezas, como as oscilações de Mirnov e as flutuações do raio-x mole, dentre outras.

2 - CONSTRUÇÃO DO LIMITADOR ERGÓDICO MAGNÉTICO

Na construção dos quatro anéis que formam o limitador ergódico magnético utilizou-se um grosso fio de cobre com 6 mm^2 de seção reta. Este fio foi dobrado sobre um suporte de madeira contento diversos pregos de aço distribuídos de maneira que este condutor passava por entre os pregos, formando assim os seguimentos de corrente.

Os condutores, em seu caminho, vão e retornam sobre si mesmos nos trechos de interesse, permitindo-se criar um campo com o dobro da intensidade para uma dada corrente circulando pelo anel, conforme pode-se notar na figura 1, onde é fornecida uma visualização de um destes anéis e o sentido do fluxo de corrente. Pode-se observar que o espaçamento entre os seguimentos do condutor não é uniforme, como seria numa geometria cilíndrica, mas sim apresenta uma distribuição que incorpora o efeito toroidal, estando suas posições definidas pela seguinte equação /6/:

$$\theta_{(l,k)} = \frac{l\pi}{7} + 0,38 \sin\left(\frac{l\pi}{7}\right) + \theta_k^{\circ} \quad (1)$$

onde 7 é o modo poloidal escolhido, l varia de 0 à 13, representando cada um dos seguimentos de corrente do anel, o valor 0,38 corresponde à ϵ na posição dos anéis, ou seja, em $r = 11,4 \text{ cm}$, k representa cada um dos quatro anéis e θ_k° é a posição poloidal do ponto de alimentação dos anéis, fornecida em graus a seguir /6/:

$\theta_1^{\circ} = -9^{\circ}$	$\theta_2^{\circ} = 3^{\circ}$
$\theta_3^{\circ} = -9^{\circ}$	$\theta_4^{\circ} = 3^{\circ}$

Estes anéis, cuja largura é de 8 cm, foram instalados sobre o vaso do TBR-1, considerando-se como referência ($\theta = 0, \phi = 0$) o lado esquerdo da flange de separação do vaso voltada para a entrada do laboratório, aproximadamente nas seguintes posições toroidais:

$\phi_1 = 22,5^{\circ}$	$\phi_2 = 157,5^{\circ}$
$\phi_3 = 202,5^{\circ}$	$\phi_4 = 337,5^{\circ}$

3 - POLARIZAÇÃO DOS ANÉIS DO L.E.M.

Através de ligações com polaridade conveniente nos quatro anéis pode-se obter dois valores diferentes para o número de onda toroidal n , ou seja, num dos arranjos tem-se $n = 2$ e no outro tem-se $n = 3$, produzindo assim os modos $m/n = 7/2$ e $m/n = 7/3$.

Para se obter cada um destes modos as ligações devem ser feitas de acordo com a tabela abaixo, onde são fornecidas além das polaridades as posições toroidais dos anéis e os ângulos poloidais dos pontos de alimentação /6/. Um esquema da polaridade dos anéis, segundo sua instalação, é fornecida na figura 2.

Anel n	Disposição		Polaridade	
	Pos. Tor. ϕ_k	Pos. Alim. θ_k°	Modo 7/2	Modo 7/3
1	$22,5^{\circ}$	-9°	neg.	pos.
2	$157,5^{\circ}$	$+3^{\circ}$	neg.	pos.
3	$202,5^{\circ}$	-9°	neg.	neg.
4	$337,5^{\circ}$	$+3^{\circ}$	neg.	neg.

4 - MÉTODO UTILIZADO NO MAPEAMENTO DOS CAMPOS

Um anel semelhante aos que foram instalados sobre o vaso do TBR-1 foi construído para ser utilizado externamente em medições de seus campos magnéticos. Este anel foi colocado sobre um suporte de madeira que simulava a curvatura poloidal do vaso do TBR-1, portanto, com raio de aproximadamente 11 cm.

Os pontos escolhidos para serem efetuadas as devidas medições dos campos magnéticos encontram-se distribuídos ao longo de curvas que simulam algumas superfícies magnéticas do próprio plasma, tendo sido desenhadas sobre um papel e colocadas na parte interna inferior do suporte de madeira. Estas superfícies foram obtidas utilizando-se o sistema de coordenadas poloidais toroidais definidas por Kucinski /7/ e utilizadas também por Valdir Okano /8/, fornecidas a seguir:

$$\rho_t = \frac{R'_o}{\cosh(\xi) - \cos(w)} \quad (2.a)$$

$$\theta_t = \pi - w \quad (2.b)$$

onde ξ , w e ϕ são as coordenadas toroidais convencionais mostradas na figura 3.

Para facilitar a obtenção do gráfico contendo as superfícies para o mapeamento foram utilizadas as coordenadas cilíndricas (z, r) definidas em função das coordenadas poloidais toroidais, ou seja /8/:

$$z = \rho_t \sin(\theta_t) \quad (3.a)$$

$$r = R'_o \left(1 - \frac{2\rho_t \cos(\theta_t)}{R'_o} - \left(\frac{\rho_t}{R'_o} \right)^2 \sin^2(\theta_t) \right)^{1/2} \quad (3.b)$$

Para se determinar o valor de R'_o , que representa o centro deste sistema de coordenadas onde ocorre a aglutinação das superfícies, foi imposta a condição que a última superfície magnética deve tocar no limitador, ou seja, em $r = 8.0$ cm. Desta forma, as condições de contorno são :

$$\theta_t = 0 \longrightarrow r = 22 \text{ cm}$$

$$\theta_t = \pi \longrightarrow r = 38 \text{ cm}$$

Efetuada-se os devidos cálculos no sistema de duas equações obtém-se para R'_o o valor 31,05, enquanto que $\rho_t(a)$ vale 7,73. Com o valor de R'_o e $\rho_t(a)$ pode-se calcular finalmente as superfícies desejadas, as quais são mostradas na figura 4. Nesta figura a superfície tracejada mais externa corresponde ao vaso e a mais interna representa o limitador. As linhas que partem do ponto central R'_o (em meio à mancha escura devido a falta de resolução angular do gráfico nesta região) correspondem, cada uma, a um mesmo valor de θ_t e interceptam, respectivamente, as superfícies caracterizadas por $\rho_t = 5$, $\rho_t = 6$, $\rho_t = 7$ e $\rho_t = 7.73$, esta última representando a superfície magnética que toca o limitador.

Estas superfícies não são exatamente circulares, mas sim apresentam uma certa "elipsoidalidade", conforme se percebe claramente pela diferença entre a última superfície e a curva tracejada do limitador. Para se perceber melhor a diferença, a figura 5 mostra uma comparação entre superfícies cilíndricas concêntricas em $R_o = 30$ cm ('x') e superfícies poloidais toroidais com ponto de aglutinação em $R'_o = 31,05$ cm ('o'). Nesta figura, as curvas contínuas são cilíndricas de raio $r = 5$ cm, $r = 6$ cm, $r = 7$ cm, $r = 8$ cm (limitador) e mais externamente $r = 11$ cm (vaso), enquanto as curvas tracejadas correspondem às mesmas superfícies

mostradas na figura 4, onde ρ_t é constante.

Os pontos onde foram medidos os campos magnéticos correspondem às intersecções entre as superfícies de ρ_t constante ("elipses") e as de θ_t constante ("raios"), formando um total de 72 pontos para cada superfície, figura 4.

Pode-se perceber ainda que o espaçamento angular entre um ponto e outro não é idêntico, variando com θ em virtude do efeito toroidal. Neste sentido, a diferença entre o ângulo poloidal convencional θ e o ângulo poloidal toroidal θ_t pode ser vista na figura 6, onde a curva tracejada representa θ_t e a curva contínua representa θ . Desta forma, em termos de θ_t há um espaçamento simétrico entre um ponto e outro no gráfico das superfícies mostrado na figura 4, correspondendo a $2\pi/72$. A expressão que relaciona os dois ângulos é fornecida a seguir:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\rho_t \sin(\theta_t)}{[(R_o - R_o' f^{1/2})^2 + (\rho_t \sin(\theta_t))^2]^{1/2}} \right) \quad (4)$$

onde:

$$f = 1 - \frac{2\rho_t \cos(\theta_t)}{R_o'} - \frac{\rho_t^2 \sin^2(\theta_t)}{R_o'^2} \quad (4.1)$$

Os campos gerados pelo anel do limitador foram criados fazendo-se passar pelo mesmo uma corrente alternada de 160 A pico a pico, suficiente para gerar campos de intensidade mensurável na bobina de detecção, bastante sensível, formada por aproximadamente 1000 enrolamentos de fino fio esmaltado, AWG 35, tendo ainda um núcleo de ferrite. A sensibilidade desta bobina, medida utilizando-se uma bobina de Helmholtz /9/, foi:

$$S = 1,385 \pm 0,015 \text{ m}^2.$$

Para minimizar ruídos de alta frequência, colocou-se um capacitor na entrada dos terminais da bobina, diminuindo bastante este problema.

5 - COMPONENTE RADIAL DO CAMPO GERADO PELO L.E.M.

A componente radial é considerada a mais importante das que compõem o campo de perturbação, uma vez que a sua presença no plasma se encontra mais diretamente relacionada com os processos de formação das estruturas denominadas de ilhas magnéticas, as quais se formam em torno das superfícies racionais ou ressonantes. Estas ilhas ao se desenvolverem podem provocar uma superposição levando à formação de regiões estocásticas (ergodização), em determinadas condições, sendo este processo interpretado como uma das prováveis causas da ocorrência de instabilidades de disrupturas em tokamaks /10,11/.

Na obtenção do seu perfil radial varreu-se desde a posição interna $r = 0$ cm até $r = 11$ cm, na posição toroidal central (no centro do anel) e em três posições poloidais diferentes: $\theta = 17^\circ$, $\theta = 109^\circ$ e $\theta = 189^\circ$, aproximadamente.

Os resultados são mostrados na figura 7, onde 'x', 'o' e 'x' correspondem a $\theta = 17^\circ$, 109° e 189° respectivamente, enquanto a curva contínua refere-se a média entre os três valores obtidos. Observa-se que o comportamento de B_r é diferente para cada posição poloidal medida, havendo uma taxa de crescimento diferente e uma inversão em $r = 9,5$ cm aproximadamente. É interessante observar que na região de interesse, ou seja, nas proximidades da periferia do plasma ($7,0 \text{ cm} < r < 8,0 \text{ cm}$) B_r é muito mais intensa na parte que corresponde ao equador externo do vaso, justamente onde os campos do plasma também são mais intensos.

Por sua vez, o perfil poloidal da componente radial pode ser medido em 72 posições angulares, conforme visto na figura 4, e em duas superfícies diferentes, uma caracterizada por $\rho_t = 7$ e outra por $\rho_t = 7,73$ (limitador), não sendo possível obter perfis em posições mais internas em decorrência da baixa intensidade do campo nestas regiões, a qual decai muito

rapidamente com r conforme mostra a figura 7.

Nas figuras 8.a e 8.b são mostrados os perfis medidos em $\rho_t = 7$ e $\rho_t = 7,73$, respectivamente, onde se percebe que o campo é não uniforme, sendo mais intenso nas posições que representam o equador externo do vaso, possuindo 7 máximos e mínimos, em concordância com o número de seguimentos de corrente que formam o anel. Pode-se observar ainda que a assimetria poloidal é mais pronunciada para a superfície $\rho_t = 7,0$ cm.

O perfil toroidal também foi obtido, prendendo-se a bobina de medição num outro suporte que procurava reproduzir a curvatura toroidal da câmara de vácuo, na posição radial $r = 7$ cm e na posição poloidal referente ao primeiro elemento de corrente. O resultado é visto na figura 9, correspondendo a um lado apenas do anel, pois o outro é simétrico a este, onde se observa que o campo permanece intenso principalmente no intervalo do anel e nas suas imediações, decaindo rapidamente a partir daí.

6 - DECOMPOSIÇÃO EM SÉRIE DE FOURIER

Com o objetivo de saber qual a composição de modos são geradas pelos campos do anel do L.E.M., efetuou-se uma decomposição em série de Fourier dos sinais referentes ao perfil poloidal da componente radial do campo magnético, os quais foram mostrados nas figuras 8.a e 8.b.

Nas figuras 10.a e 10.b são mostradas as porcentagens com que cada modo contribui para os sinais, correspondentes às superfícies de $\rho_t = 7$ e $\rho_t = 7,73$, respectivamente. O mais importante a salientar é que ocorre realmente uma predominância da componente $m = 7$, conforme era desejado, ainda que com uma banda lateral significativa, possivelmente decorrente de efeitos toroidais e do processo de medida. Também se observa uma pequena diferença nos resultados dos dois sinais, sendo que a predominância da componente $m = 7$ é mais acentuada na superfície mais externa, próxima ao limitador.

7 - IMPORTÂNCIA DO USO DO SISTEMA DE COORDENADAS POLOIDAIS TOROIDAIS

A utilização do sistema de coordenadas poloidais toroidais no mapeamento dos campos gerados pelo L.E.M. se justifica pelo fato destas coordenadas se mostrarem bastante convenientes, uma vez que incorporam em si efeitos toroidais /7,8/. Desta forma, o equilíbrio do plasma, quando estudado neste sistema de coordenadas, indica que as superfícies magnéticas de $\psi(\rho_t, \theta_t)$ constante são, na aproximação em ordem zero, expressas pelas curvas de ρ_t constante /8/.

Vamos agora, a título de comparação, verificar qual seria a composição dos campos se fosse utilizado um sistema de coordenadas cilíndrico, onde os pontos de medição estejam igualmente separados de $\theta = 2\pi / 72$ e se situem sobre as superfícies mostradas na figura 11, ou seja, em circunferências de raio r constante e não ρ_t constante como antes.

O perfil obtido na posição radial $r = 7,0$ cm é mostrado na figura 12, sendo também observada a assimetria poloidal. O mais importante, no entanto, é o resultado da decomposição deste sinal em série de Fourier, mostrado na figura 13, o qual indica que a componente $m = 7$ deixa de ser a dominante, passando o predomínio a ser exercido pelas componentes $m = 5$ e $m = 6$, contrariando as expectativas e a formulação utilizada na construção do anel do limitador.

Assim, fica evidente que é necessário compatibilizar o sistema de coordenadas a ser utilizado no mapeamento dos campos gerados pelo anel do L.E.M., uma vez que em sua construção está implícito efeitos toroidais, evitando desta maneira distorções nos resultados e em sua interpretação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer as valiosas discussões e sugestões apresentadas pelos companheiros Valdir Okano e Elton Cesar da Silva, principalmente no que se refere ao processo de medição dos campos gerados pelo anel do limitador.

8 - REFERÊNCIAS

- [1] - Lippmann, S.; Finkenthal, M.; Moos, H. W.; McCool, S. C.; Wootton, A. J.; "Spectroscopy Diagnostics Applied to TEXT Ergodic Magnetic Limiter Experiment", Fusion Research Center, Texas, FRCR #355, Fevereiro, 1990.
- [2] - Shen, Y.; Miyake, M.; Takamura, S.; Kuroda, T.; Okuda, T.; "Ergodic Magnetic Limiter Experiments in the Hybtok-II Tokamak", Jour. Nucl. Materials, n^o 168, 1989.
- [3] - Takamura, S.; Sakurai, K.; Shen, Y.; Hodo, H.; Nishioka, T.; Miyake, M.; Sakurai, S.; "Effects of Ergodic Magnetic Limiter on HYBTOK-II Tokamak Plasma", 13th Int. Conf. on Plas. Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res., Washington, IAEA-CN-53/A-7-8, 1990.
- [4] - McCool, S. C. et al; "Electron Thermal Confinement Studies With Applied Resonant Fields on TEXT", Nuclear Fusion, vol. 29, n^o 4, 1989.
- [5] - Takamura, S.; Ohnishi, N.; Yamada, H.; Okuda, T.; "Electric and Magnetic Structure of an Edge Plasma in a Tokamak With a Helical Magnetic Limiter", Phys. Fluids 30 (1), 1987.
- [6] - Yu, X. H.; deGrassie, J. S.; "Mapping Techniques for the GA Ergodic Magnetic Limiter Experiment", Report of Fusion Research Center, The University of TEXAS, DOE/ET/53043-30, SRC#292, Novembro, 1986.
- [7] - Kucinski, M. Y.; Caldas, I. L.; Monteiro, L. H. A.; Okano, V.; "Toroidal Plasma Equilibrium With Arbitrary Current Distribution", Publicação IFUSP /P-818, 1990.

[8] - Okano, V.; "Campos Ressonantes Helicoidais em Tokamaks", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1990.

[9] - Araújo, M. S. T.; Vannucci, A.; "Construção e Calibração de Sondas Magnéticas Poloidais e Toroidais do TBR-1", Publicação IFUSP /P-953, Novembro, 1991.

[10] - Araújo, M. S. T. A.; "Investigação da Atuação de Campos Helicoidais Ressonantes na Ativação/Inibição das Oscilações MHD no TBR-1", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1991.

[11] - Vannucci, A.; "Instabilidades de Disruptura no TBR-1", Tese de Doutorado, IFUSP, 1987.

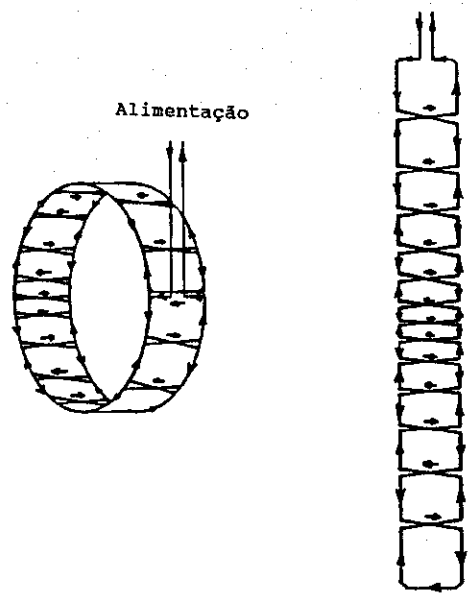


Fig. 1 - Esquema de um anel do L.E.M. mostrando o fluxo de corrente.

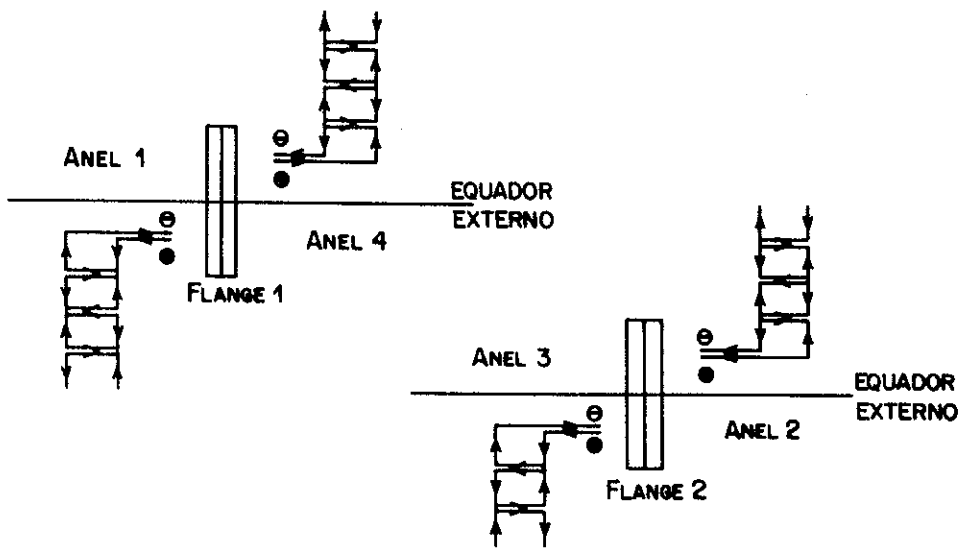


Fig. 2 - Esquema da polaridade dos anéis do L.E.M. conforme instalados sobre o vaso.

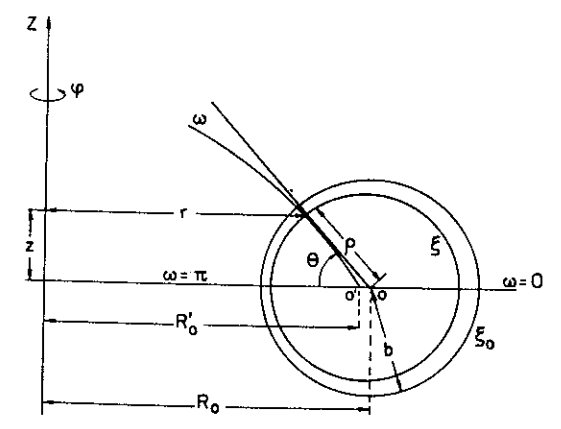


Fig. 3 - Sistema de coordenadas toroidais.

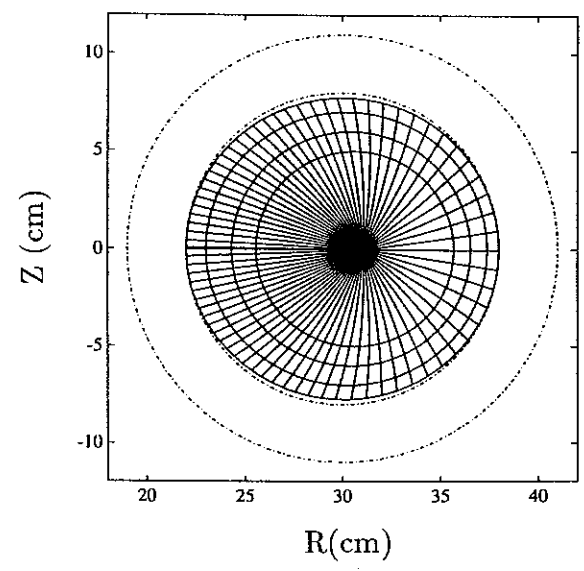


Fig. 4 - Superfícies utilizadas para o mapeamento dos campos do L.E.M.

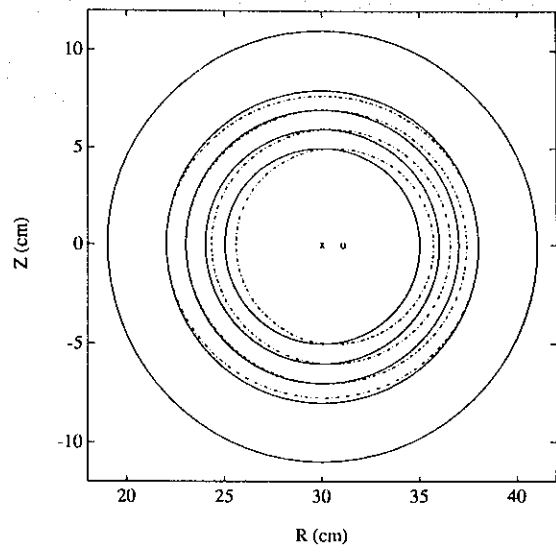


Fig. 5 - Comparação entre superfícies cilíndricas e poloidais toroidais.

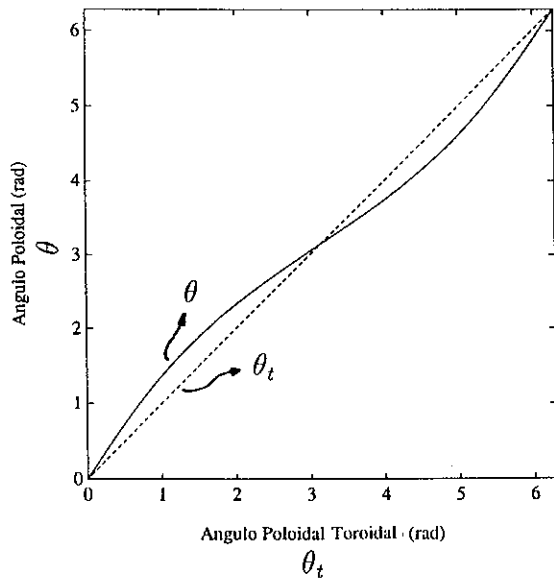


Fig. 6 - Comparação entre o â ngulo poloidal θ e o â ngulo poloidal toroidal θ_t .

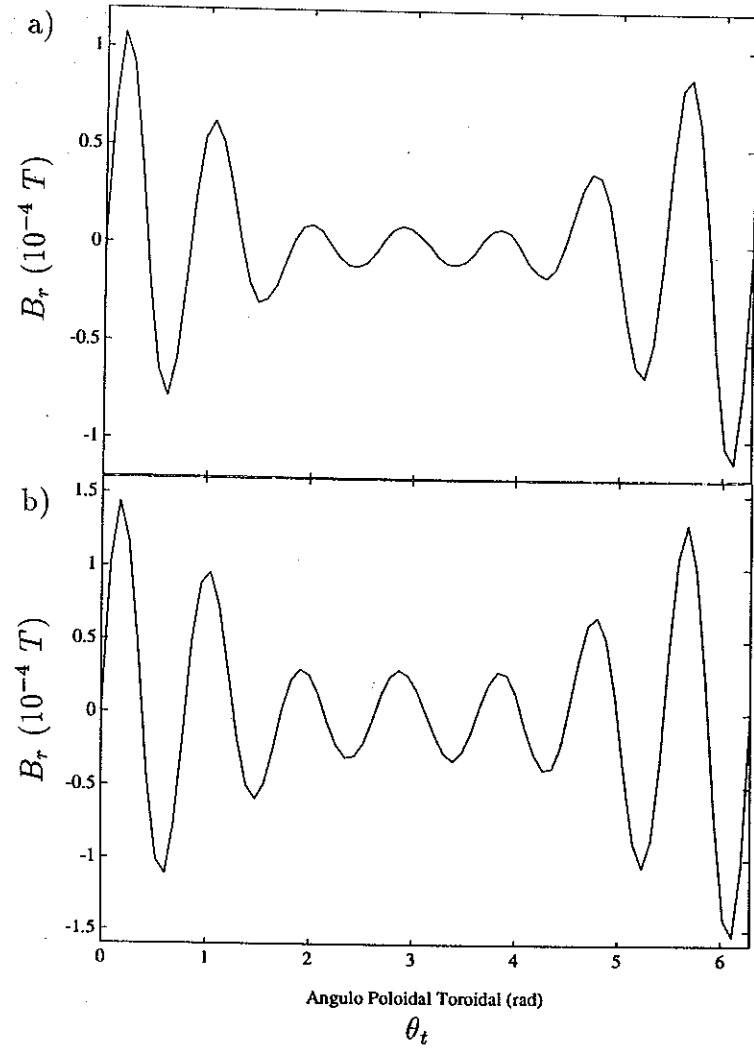


Fig. 8 - Perfil poloidal de B_r criado pelo L.E.M. em $\rho_t = 7,0$ (a) e em $\rho_t = 7,73$ (b).

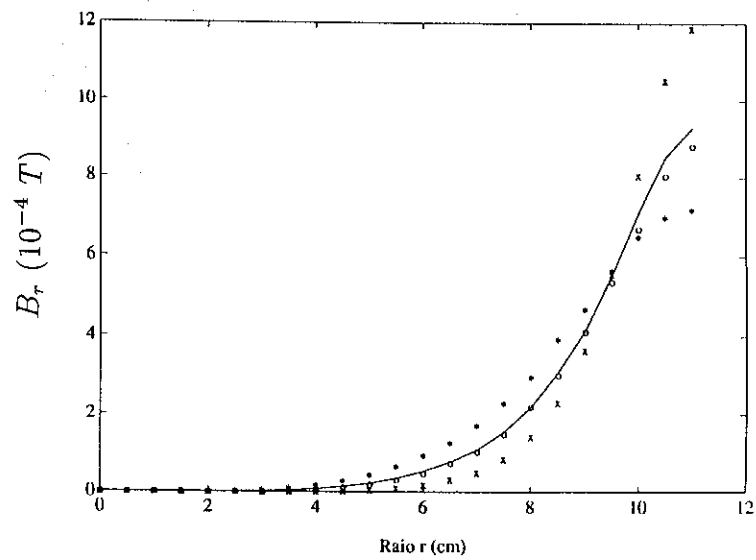


Fig. 7 - Perfil radial de B_r criado pelo L.E.M. em $\theta = 17^\circ$ (*), $\theta = 109^\circ$ (o) e $\theta = 189^\circ$ (x).

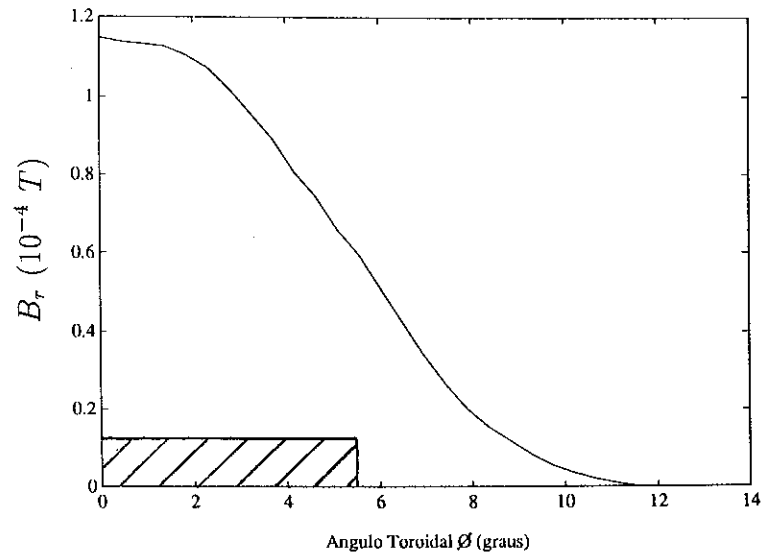


Fig. 9 - Perfil toroidal de B_r criado pelo L.E.M.

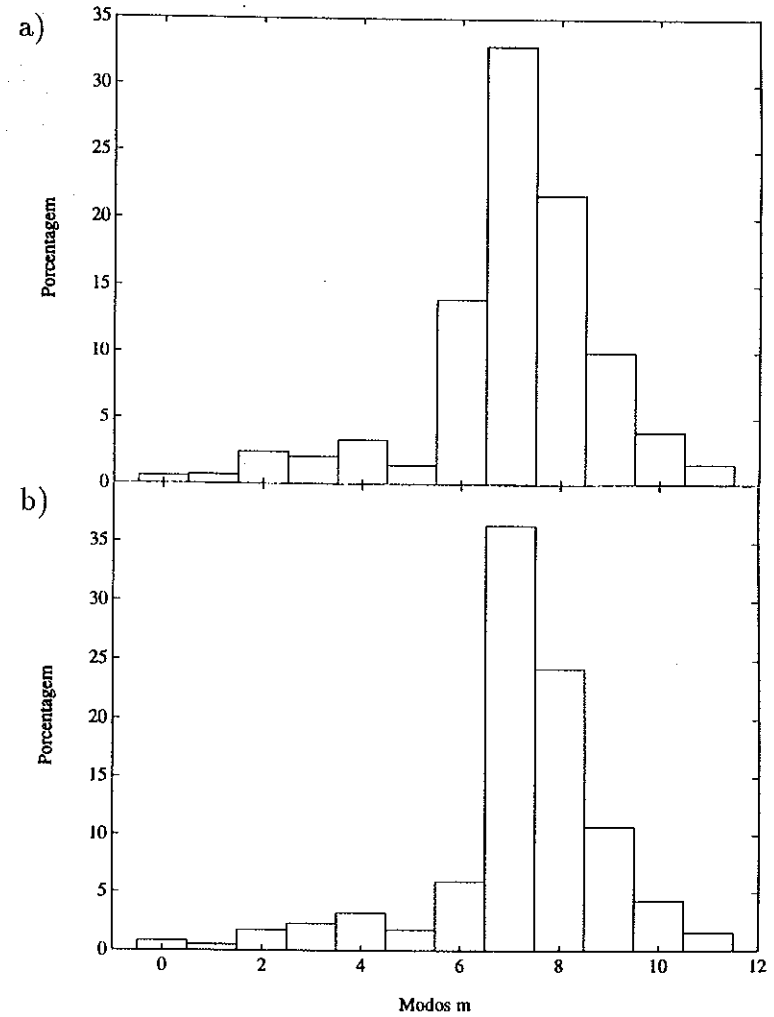


Fig. 10 - Composição de modos gerados pelo L.E.M. em $\rho_t = 7$ (a) e em $\rho_t = 7,73$ (b).

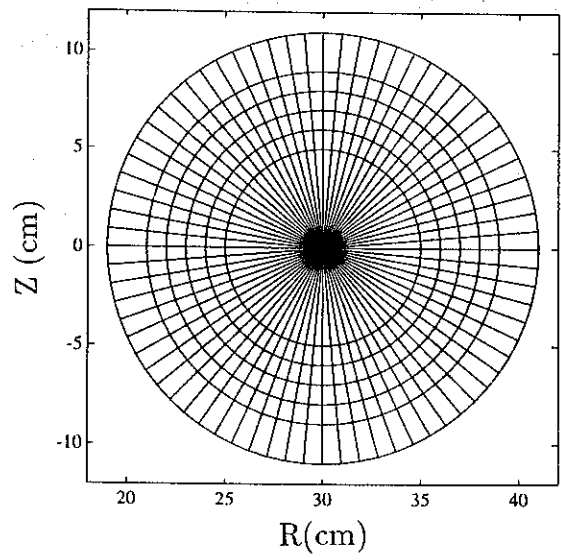


Fig. 11 - Superfícies com geometria cilíndrica para o mapeamento dos campos.

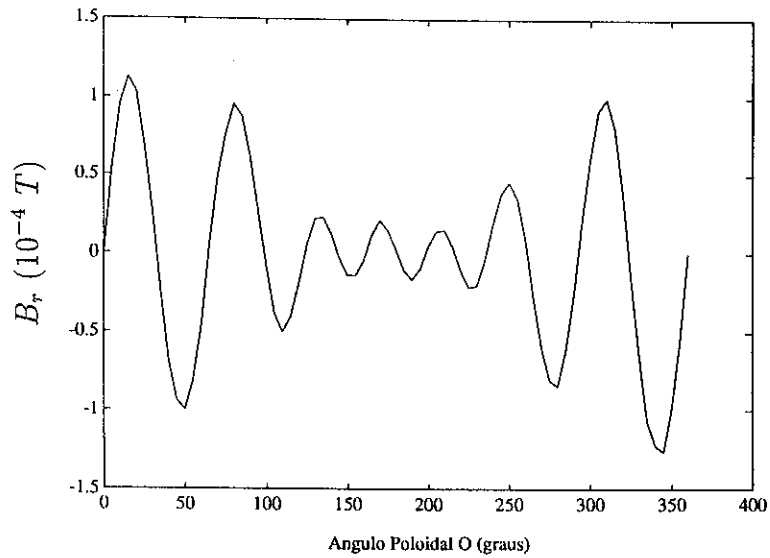


Fig. 12 - Perfil poloidal de B_r criado pelo L.E.M. em $r = 7,0$ cm.

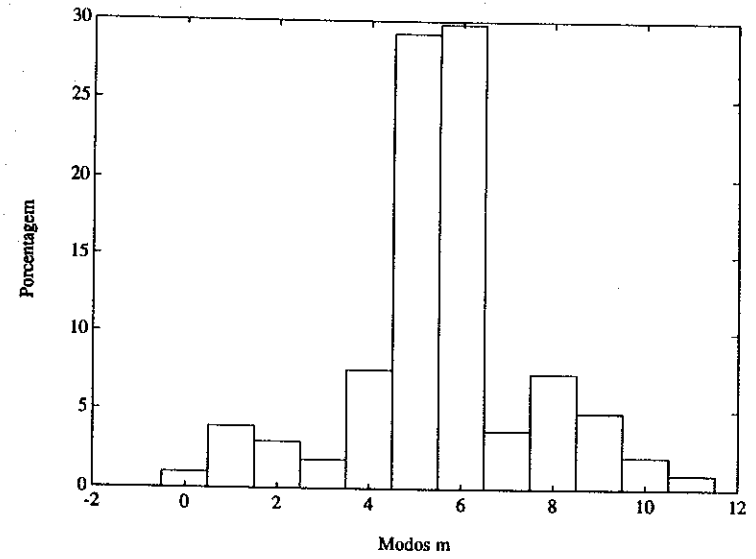


Fig. 13 - Composição de modos de B_r obtidos para o perfil poloidal medido em $r = 7$ cm.