

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

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

**PUBLICAÇÕES**

IFUSP/P-1056

**RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MALHAS  
DO CAMPO HELICOIDAL RESSONANTE DO  
TOKAMAK TBR-1**

**Mauro Sérgio T. de Araújo**  
Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Junho/1993

# RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MALHAS DO CAMPO HELICOIDAL RESSONANTE DO TOKAMAK TBR-1

Mauro Sérgio T. de Araújo

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

## RESUMO

As antigas malhas condutoras utilizadas para gerar os Campos Helicoidais Ressonantes (CHR) tiveram que ser retiradas de sobre o vaso do tokamak TBR-1 quando da sua recente manutenção. Desta forma, optou-se em sua reimplantação por efetuar-se algumas alterações bastante significativas neste sistema. Destas alterações a mais importante é certamente a mudança na configuração geométrica dos enrolamentos, os quais passaram a contar com uma correção toroidal em suas helicidades. Além desta mudança, colocou-se enrolamentos independentes para duas helicidades diferentes, ou seja,  $m/n = 4/1$  e  $m/n = 2/1$ , bem como processou-se um redimensionamento da espessura dos condutores utilizados, instalando-se novas cordoalhas com aproximadamente a metade da espessura das anteriores.

## 1 - CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS ENROLAMENTOS

Os enrolamentos helicoidais que existiam anteriormente sobre o vaso do tokamak TBR-1 foram feitos tendo-se por base uma configuração geométrica cilíndrica e, desta forma, todos os condutores foram dispostos de maneira poloidalmente equidistantes /1/.

Entretanto, este arranjo não era o mais adequado, uma vez que não permitia obter uma composição de componentes de campo conforme se desejava, porém, nada se podia fazer em virtude deste sistema encontrar-se colado junto à superfície externa do vaso /2/, consistindo assim um sistema fixo e inalterável após sua instalação. Agora, com a necessidade de se desmontar o TBR-1 e se refazer diversos sistemas optou-se por introduzir uma correção toroidal nestes enrolamentos, motivados principalmente pelo objetivo de se melhorar a composição dos campos externos produzidos e, com isto, otimizar a sua utilização no estudo dos efeitos dos CHR aplicados durante o confinamento do plasma /3/.

Os novos enrolamentos tiveram por base uma correção em sua geometria de maneira que cada condutor passasse a acompanhar a seguinte equação (lei de enrolamento) /3/:

$$\frac{d\phi}{d\theta'} = q(r_c) \quad (1)$$

onde:

$$d\theta' = \frac{d\theta}{1 + \epsilon \cos(\theta)} \quad (2)$$

sendo  $\theta$  o ângulo poloidal,  $\epsilon = r_c / R_0$ ,  $r_c = 11,4$  cm o raio dos condutores externos e  $R_0 = 30,0$  cm o raio maior do vaso.

Na aproximação cilíndrica utilizada anteriormente tinha-se  $\epsilon = 0$  ( $R_0 \cong \infty$ ) e portanto  $d\theta / d\phi$  era constante. Com a correção toroidal  $d\theta / d\phi$  passa a depender de  $\theta$ , alterando significativamente a distribuição dos condutores sobre o vaso.

Os gráficos de  $d\theta / d\phi$ , para os modos  $m/n = 4/1$  e  $m/n = 2/1$ , são mostrados nas figuras 1 e 2, respectivamente, onde se pode acompanhar esta dependência com o ângulo poloidal. Destas figuras percebe-se que a variação angular é mais intensa para o modo  $m/n = 2/1$ , impondo uma maior inclinação para os enrolamentos que formam este modo.

O espaçamento inicial dos condutores, no ponto de referência  $\theta = 0$  e  $\phi = 0$ , considerado como sendo o lado esquerdo da flange de separação das duas metades do vaso (voltadas para a porta de entrada do laboratório) e no equador externo, foi observado considerando-se a seguinte equação /3/:

$$\theta_{(l)} = \frac{l\pi}{m} + \epsilon \sin\left(\frac{l\pi}{m}\right) \quad (3)$$

onde  $m$  é o número correspondente ao modo poloidal escolhido, neste caso assumindo os valores 2 ou 4,  $l$  representa cada um dos condutores, variando de 0 até  $2m - 1$ , e  $\epsilon = 0,38$ , correspondendo à posição onde estes enrolamentos estão colocados.

A partir deste ponto inicial foram calculados os incrementos poloidais correspondentes a um determinado incremento toroidal fixo, escolhido como sendo  $d\phi = 2\pi/15$  rad, e estes pares ordenados foram demarcados sobre o vaso com caneta piloto, para fornecer uma trilha por onde deveriam passar os condutores. Na demarcação destes pontos utilizou-se uma régua flexível que permitia acompanhar a curvatura poloidal do vaso.

Após a demarcação da trilha os condutores foram então colocados sobre o vaso, presos temporariamente com arames e fitas colantes em diversos pontos, sendo por último colados com araldite ao longo de praticamente todo o seu percurso. Na parte interna os enrolamentos tiveram de ser um pouco deslocados de suas posições para permitir a colocação posteriormente das espiras do campo toroidal. As extremidades foram identificadas com números para poderem ser devidamente ligadas aos painéis de conexões. Depois de seco o araldite, os fios e fitas foram retirados, terminando assim a implantação do sistema sobre o vaso.

Estas alterações na configuração geométrica dos enrolamentos helicoidais possibilitou realmente obter-se campos de perturbação onde as componentes desejadas são dominantes, conforme será mostrado claramente no item 4.

## 2 - COLOCAÇÃO DE ARRANJOS INDEPENDENTES

Sendo os arranjos referentes aos modos  $m/n = 4/1$  e  $m/n = 2/1$  os mais utilizados e importantes no estudo dos efeitos de campos helicoidais externos sobre o plasma do tokamak TBR-1, efetuou-se uma segunda alteração no sentido de torná-los independentes, cada um com sua respectiva correção toroidal. Isto encerrará a necessidade de se efetuar ligações alternativas nos painéis de conexões do modo  $m/n = 4/1$  para se obter algo que reproduza aproximadamente o modo  $m/n = 2/1$ .

Desta forma, projetou-se a colocação destes dois arranjos independentes, com a diferença que enquanto o enrolamento destinado ao modo  $m/n = 2/1$  possui condutores contínuos sobre o vaso, ou seja, não há pontos de descontinuidade para levá-los aos painéis de conexões, a menos evidentemente dos dois pontos de alimentação, o enrolamento destinado ao modo  $m/n = 4/1$  permanece com o esquema de dois painéis opostos toroidalmente, de sorte que os condutores, à cada meia volta na direção toroidal, são obrigados a desviarem para os painéis de conexões.

Com isto, o arranjo instalado para o modo  $m/n = 4/1$  permite ainda que sejam efetuadas ligações alternativas para fornecer os modos  $m/n = 2/1$  e  $m/n = 3/1$ , ainda que em tais ligações não esteja garantida nenhuma simetria cilíndrica ou toroidal, devendo-se calcular o espectro de modos produzidos por cada arranjo para se saber o que realmente esta sendo aplicado sobre o plasma neste tipo de ligação, da mesma forma que já ocorria com o arranjo anterior.

Uma visualização de como se encontram estes condutores sobre o vaso do tokamak TBR-1 é mostrada nas figuras 3 e 4, correspondendo aos modos  $m/n = 4/1$  e  $m/n = 2/1$  respectivamente, podendo-se observar também as posições das janelas da câmara de vácuo. Percebe-se claramente a diferença na inclinação dos condutores em função do ângulo  $\theta$ , bem como a diferença existente entre um e outro enrolamento.

Outra característica advinda da correção toroidal é que na parte externa do vaso os seguimentos de corrente estão mais afastados, enquanto na parte interna encontram-se mais próximos.

### 3 - REDIMENSIONAMENTO DAS CORDOALHAS UTILIZADAS

Os condutores utilizados para gerar os campos de perturbação helicoidal externo são formados por uma treliça de fios finos, feitos de cobre estanhado, denominada cordoalha. Para efetuar seu isolamento do vaso e dos outros sistemas estas cordoalhas foram recobertas com um termo-retrátil ("shirink"). Nos enrolamentos anteriores, esta cordoalha possuía largura de 2,5 cm, estando portanto com sua dimensão superestimada, uma vez que nunca se aplicou correntes superiores a 550 A, seja por incapacidade da fonte utilizada ou pela dificuldade de se manter o confinamento do plasma aplicando perturbações maiores, e sabe-se que para esta dimensão poderia-se passar correntes muito mais intensas.

Considerando-se então estas limitações e levando-se em consideração que ao tornar independente os dois arranjos seria preciso colocar sobre o vaso uma quantidade maior de condutores, resolveu-se então utilizar uma outra cordoalha, com apenas 1 cm de largura, mas que ainda assim permite a passagem de algumas centenas de amperes, dentro portanto do limite imposto pela fonte e das necessidades em sua utilização.

Esta cordoalha mais estreita ocupa menos espaço sobre o vaso, impedindo que este fique muito carregado de condutores e atrapalhe a colocação dos outros sistemas. Além disto, por ser mais flexível torna-se mais fácil de se manusear, uma vez que em muitos pontos é preciso dobrá-la para contornar as janelas existentes, conforme se observa nas figuras 3 e 4. Outra vantagem é que permite um posicionamento mais preciso quanto aos ângulos poloidal e toroidal.

### 4 - MAPEAMENTO E DECOMPOSIÇÃO DOS CAMPOS GERADOS COM A NOVA CONFIGURAÇÃO

Para saber qual a composição de modos formam os campos produzidos pelo novo arranjo dos condutores helicoidais procurou-se mapear estes campos, efetuando-se posteriormente uma decomposição em série de Fourier. Entretanto, ao invés de se medir os campos gerados pelos próprios condutores colocados ao redor do vaso, o que não seria possível no momento em virtude do tokamak TBR-1 ainda não se encontrar disponível para qualquer atividade,

optou-se por construir anéis que reproduzíssem um seguimento destes condutores, semelhante ao anel do Limitador Ergódico Magnético implantado recentemente /4/, porém obedecendo à distribuição de elementos de corrente referentes aos modos  $m/n = 4/1$  e  $m/n = 2/1$ .

Estes anéis correspondem à uma "fatia" toroidal dos verdadeiros condutores helicoidais, de maneira que os resultados obtidos assim podem ser considerados como uma boa aproximação para os Campos Helicoidais Ressonantes (CHR). Quando o TBR-1 voltar a operação os campos gerados pelas cordoalhas poderão então ser medidos com as bobinas de Mirnov e decompostos para se comparar com os resultados aqui obtidos.

O mapeamento foi feito medindo-se a componente radial do campo gerado pela passagem de uma corrente alternada de 160 A de amplitude pico à pico sobre os anéis, colocados sobre um suporte de madeira para simular a curvatura poloidal do vaso.

Os pontos onde os campos foram medidos pertencem à curvas que simulam superfícies magnéticas do plasma, construídas com a utilização das coordenadas poloidais toroidais definidas por Kucinski e descritas a seguir /5/:

$$\rho_t = \frac{R'_o}{\cosh(\xi) - \cos(w)} \quad (4.1)$$

$$\theta_t = \pi - w \quad (4.2)$$

$$\phi_t = \phi \quad (4.3)$$

onde  $\xi$ ,  $w$  e  $\phi$  são as coordenadas toroidais convencionais.

As superfícies procuradas são aquelas onde  $\rho_t$  é contante, pois correspondem às superfícies de  $\psi$  constante /6/.

A determinação de  $R'_o$ , que representa o centro deste sistema de coordenadas onde ocorre a aglutinação das superfícies, foi feita impondo-se como condição de contorno que a última superfície magnética deve tocar no limitador, de onde se obtém como resultados  $R'_o = 31,05$  cm e  $\rho_t(a) = 7,73$  /4/.

Uma visualização destas superfícies é fornecida na figura 5, onde a superfície tracejada mais externa representa o vaso e a mais interna o limitador. As 72 linhas que partem do ponto central  $R'_0$  correspondem cada uma a um mesmo valor de  $\theta_t$  e interceptam as superfícies caracterizadas por  $\rho_t = 5$ ,  $\rho_t = 6$ ,  $\rho_t = 7$  e  $\rho_t = 7,73$  justamente nos pontos de medição dos campos. O espaçamento angular entre um ponto e outro não é idêntico, uma vez que corresponde a intervalos iguais de  $\theta_t$  ( $2\pi/72$ ) e não de  $\theta$ , o ângulo poloidal convencional. A diferença entre os dois ângulos pode ser vista na figura 6, onde a curva tracejada representa  $\theta_t$  e a curva contínua representa  $\theta$ .

#### 4.1 - CAMPO HELICOIDAL RESSONANTE $m/n = 4/1$

A componente radial criada pelo anel do modo  $m/n = 4/1$  teve seu perfil radial medido entre o centro,  $r = 0$  cm, e a posição próxima dos condutores,  $r = 11$  cm, em três posições poloidais distintas, sendo mostrada na figura 7, onde 'o', 'x' e '\*' correspondem à  $\theta = 86^\circ$ ,  $\theta = 195^\circ$  e  $\theta = 330^\circ$ , respectivamente. É interessante observar a significativa diferença na taxa de crescimento de  $B_r$  em função da posição poloidal, uma vez que ocorre uma inversão próximo de  $r = 9,0$  cm. Assim,  $B_r$  é mais intensa na região externa do vaso, onde os campos do plasma também são mais intensos, justamente na região de interesse, ou seja, nas vizinhanças de  $r = 7,0$  cm onde se encontra normalmente a superfície ressonante  $q = 4/2$ .

O perfil poloidal de  $B_r$  foi medido nos 72 pontos das quatro superfícies mostradas na figura 5, podendo ser vistos nas figuras 8, 9, 10 e 11, conjuntamente com o resultado da decomposição em série de Fourier expressa na forma de porcentagem de cada modo, correspondendo respectivamente à  $\rho_t = 5, 6, 7$ , e  $7,73$ . A assimetria poloidal é mais intensa nas regiões mais internas, o que está de acordo com o perfil radial mostrado na figura 7. Além disto, a predominância da componente  $m = 4$  é mais acentuada nas vizinhanças da região ressonante  $q = 4$ , ou seja, a partir de  $\rho_t = 7,0$  cm  $/2/$ , como seria desejado.

Para se ter uma melhor idéia de como o perfil poloidal de  $B_r$  varia com  $\rho_t$ , produziu-se um gráfico conjunto das quatro posições medidas, o que é mostrado na figura 12.a. Por sua

vez, na figura 12.b é mostrada a alteração observada na composição dos modos, de onde se pode perceber mais claramente o aumento da pureza da componente  $m = 4$  a medida que se alcança a borda do plasma, uma vez que sua participação aumenta de 38% em  $\rho_t = 5$  para aproximadamente 60% em  $\rho_t = 7,73$ .

#### 4.2 - CAMPO HELICOIDAL RESSONANTE $m/n = 2/1$

O procedimento utilizado para medir os campos gerados pelo anel do CHR  $m/n = 2/1$  foi o mesmo que para o anel do CHR  $m/n = 4/1$ , de maneira que a figura 13 mostra o perfil radial de  $B_r$  medido em três posições poloidais diferentes,  $\theta = 65^\circ$  ('\*'),  $\theta = 145^\circ$  ('x') e  $\theta = 330^\circ$  ('o'). A mesma inversão observada anteriormente é percebida aqui, embora agora ocorra mais internamente, ou seja, próximo de  $r = 6,0$  cm. Uma diferença observada diz respeito a mudança de sinal de  $B_r$  na região  $r < 2,0$  cm.

Os perfis poloidais de  $B_r$  e respectivos resultados da decomposição em série de Fourier podem ser vistos nas figuras 14, 15, 16 e 17, correspondendo à  $\rho_t = 5, 6, 7$  e  $7,73$ .

A assimetria poloidal mostra-se menos intensa que no caso anterior e a participação da componente  $m = 2$  mantém-se quase constante ao longo das superfícies medidas, abrangendo a superfície ressonante  $q = 2/2/$ , apresentando uma média de 58%.

O gráfico conjunto das quatro posições medidas é fornecido na figura 18, onde se observa mais facilmente a menor assimetria poloidal em função de  $\rho_t$  e a constância do predomínio da componente  $m = 2$ , com pequena alteração no perfil de sua porcentagem, ao contrário do mostrado para o anel  $m/n = 4/1$ , figura 12.

### 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Acredita-se que as modificações introduzidas nos enrolamentos responsáveis pelos Campos Helicoidais Ressonantes possam tornar o sistema ainda mais eficiente, sendo capaz de produzir campos formados por uma distribuição de componentes mais favoráveis à sua aplicação nos estudos da interação de perturbações magnéticas externas com o plasma confinado pelo tokamak TBR-1.

Por sua vez, a colocação de enrolamentos independentes para os modos  $m/n = 4/1$  e  $m/n = 2/1$  pode até mesmo permitir uma utilização simultânea destes dois modos, ou ainda, dos modos  $m/n = 3/1$  e  $m/n = 2/1$ , caso se opte por efetuar ligações alternativas nos painéis de conexões. Assim, é possível estudar a resposta do plasma quando duas perturbações helicoidais distintas são aplicadas ao mesmo tempo, embora talvez seja necessário para isto diminuir a intensidade da corrente que circula pelos condutores helicoidais afim de não destruir o confinamento.

Outra opção de trabalho no tokamak TBR-1 passa a ser a utilização simultânea dos Campos Helicoidais Ressonantes, nas configurações possíveis discutidas acima, com o também recém implantado sistema de quatro anéis do Limitador Ergódico Magnético /4/, o que poderá ser efetuado ligando-se em série os dois sistemas.

Infelizmente, as medições de campos que serão possíveis de ser efetuadas com os condutores helicoidais implantados sobre o vaso do TBR-1, a partir das bobinas de Mirnov, são muito mais limitadas, uma vez que este diagnóstico possui apenas 16 bobinas e sua posição radial é fixa em  $r = 9,5$  cm. Mesmo assim, espera-se obter resultados compatíveis com os aqui apresentados.

## 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - Tan, I. H.; "Oscilações MHD no TBR-1", Dissertação de Mestrado apresentada no IFUSP, 1984.

[2] - Araújo, Mauro S. T.; "Investigação da Atuação de Campos Helicoidais Ressonantes na Ativação/Inibição das Oscilações MHD do TBR-1", Dissertação de Mestrado apresentada no IFUSP, Dezembro, 1991.

[3] - Yu, X. H.; deGrassie, J. S.; "Mapping Techniques for the GA Ergodic Magnetic Limiter Experiment", Report do Fusion Research Center, The University of Texas, DOE/ET/53043-30, SRC#292, Nov., 1986.

[4] - Araújo, M. S. T.; "Construção dos Anéis do Limitador Ergódico Magnético do Tokamak TBR-1", Publicação IFUSP, a ser impressa.

[5] - Kucinsky, M. Y.; Caldas, I. L.; Monteiro, L. H. A.; Okano, V.; "Toroidal Plasma Equilibrium With Arbitrary Current Distribution", Publicação IFUSP/P-818, 1990.

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

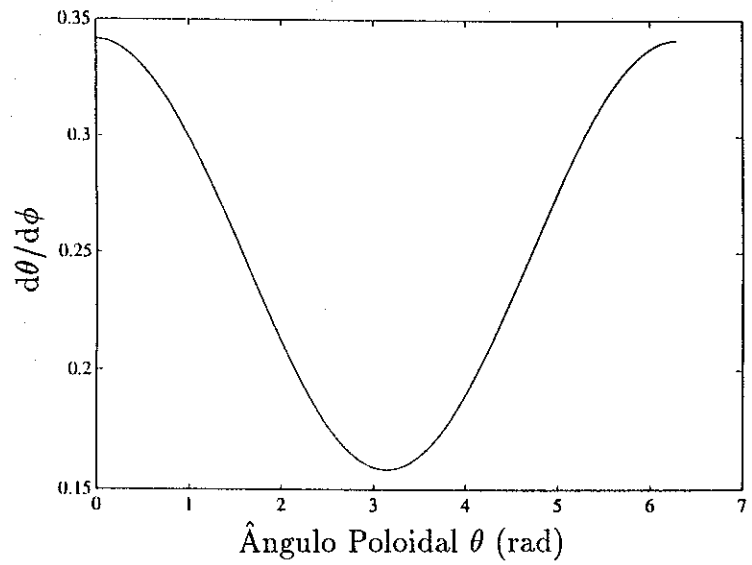


Fig. 1 - Correção toroidal de  $d\theta/d\phi$  para o modo  $m/n = 4/1$ .

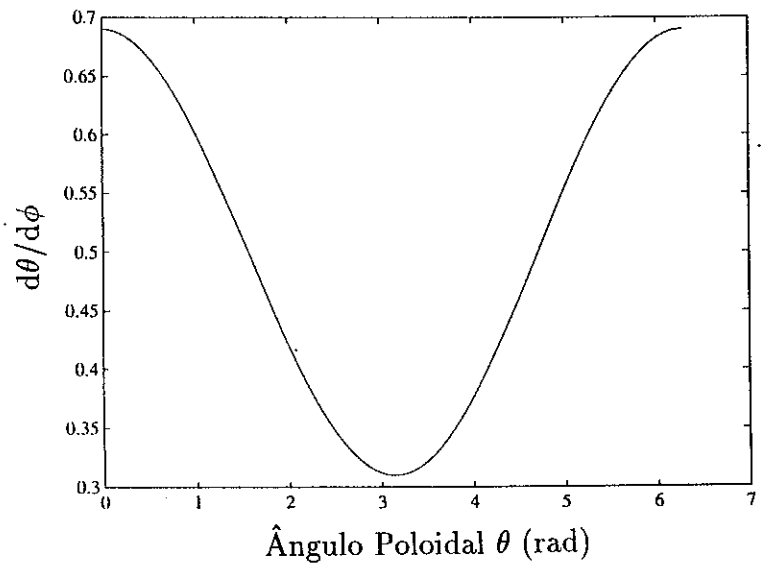


Fig. 2 - Correção toroidal de  $d\theta/d\phi$  para o modo  $m/n = 2/1$ .

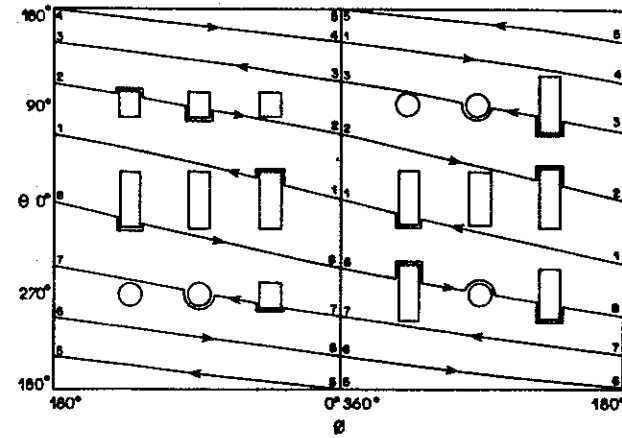


Fig. 3 - Esquema da distribuição dos condutores helicoidais que compõem o modo  $m/n = 4/1$  sobre o vaso do tokamak.

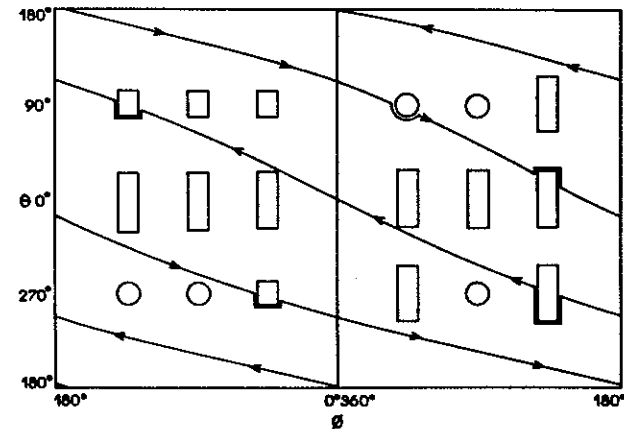


Fig. 4 - Esquema da distribuição dos condutores helicoidais que compõem o modo  $m/n = 2/1$  sobre o vaso do tokamak.

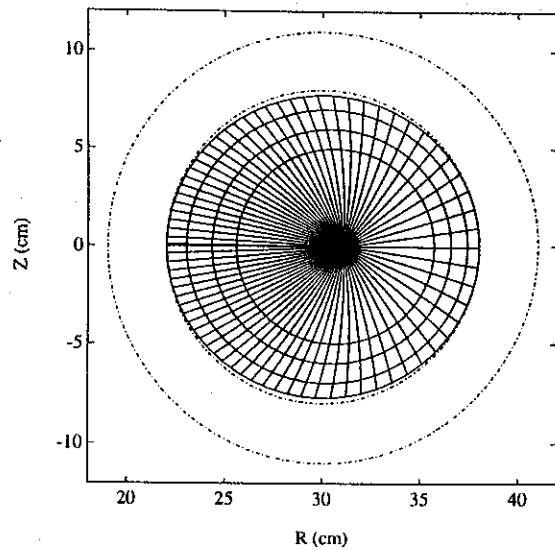


Fig. 5 - Superfícies utilizadas no mapeamento dos Campos Helicoidais Ressonantes.

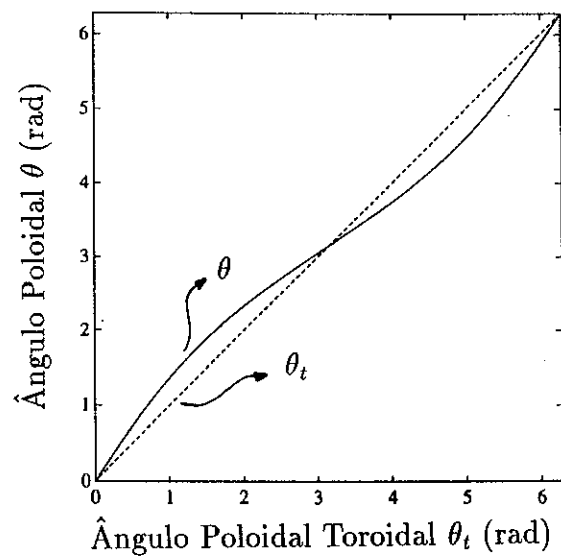


Fig. 6 - Comparação entre o ângulo poloidal convencional  $\theta$  e o ângulo poloidal toroidal  $\theta_t$ .

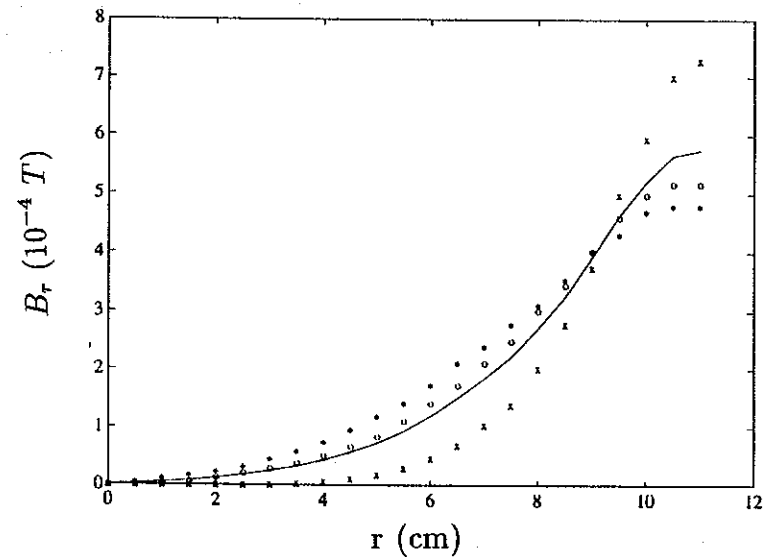


Fig. 7 - Perfil radial de  $B_r$  criado pelo enrolamento do CHR  $m/n = 4/1$ , medido nas posições  $\theta = 86^\circ$  ('o'),  $\theta = 195^\circ$  ('x') e  $\theta = 330^\circ$  ('\*'). A curva contínua representa a média dos valores obtidos.



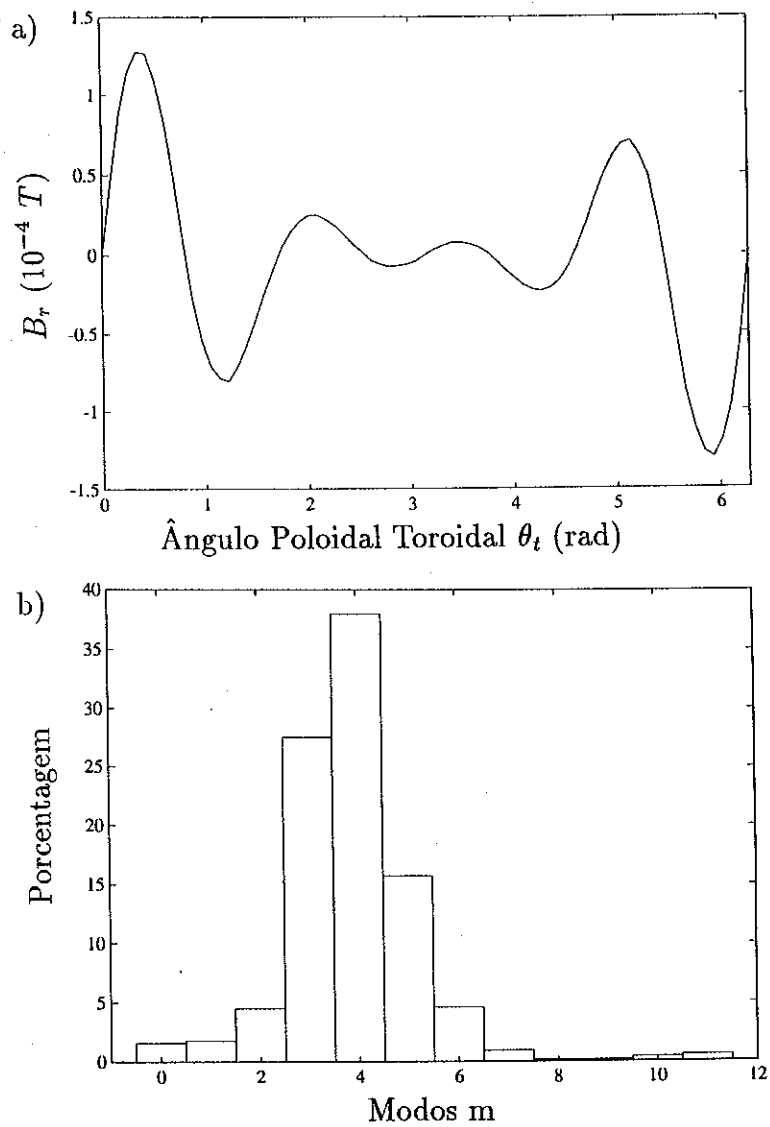


Fig. 8 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 4/1$  em  $\rho_t = 5,0 \text{ cm}$  (a) e sua composição de modos (b).

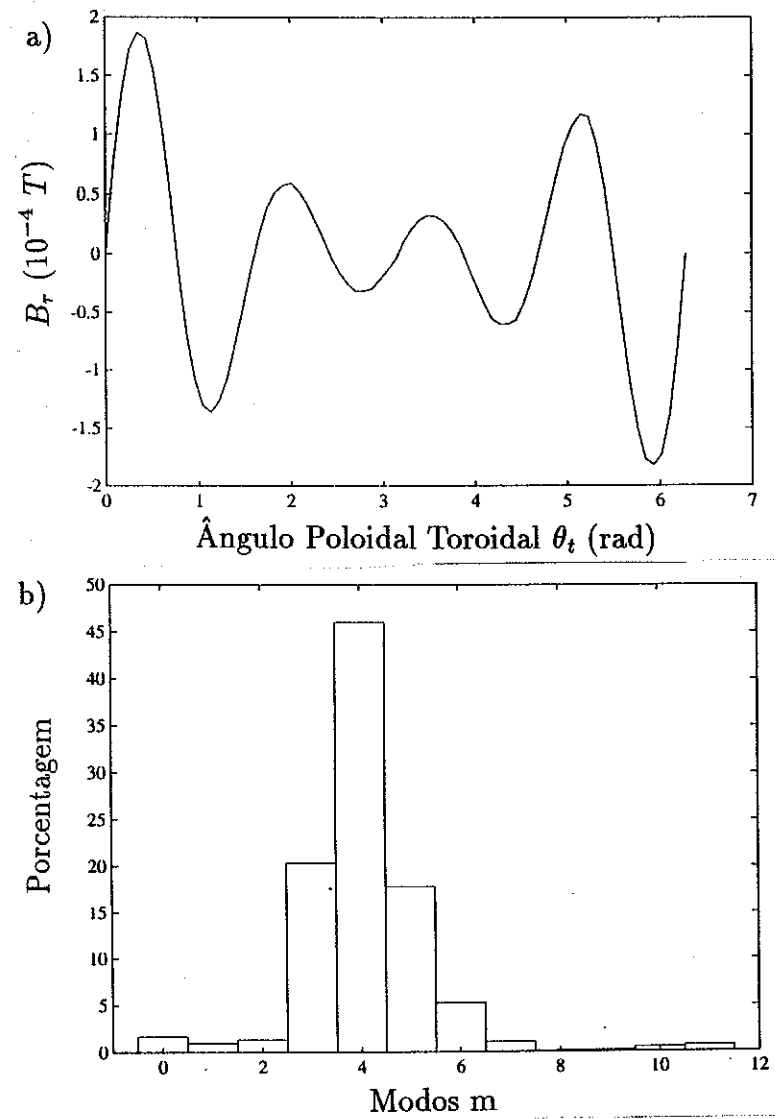


Fig. 9 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 4/1$  em  $\rho_t = 6,0 \text{ cm}$  (a) e sua composição de modos (b).

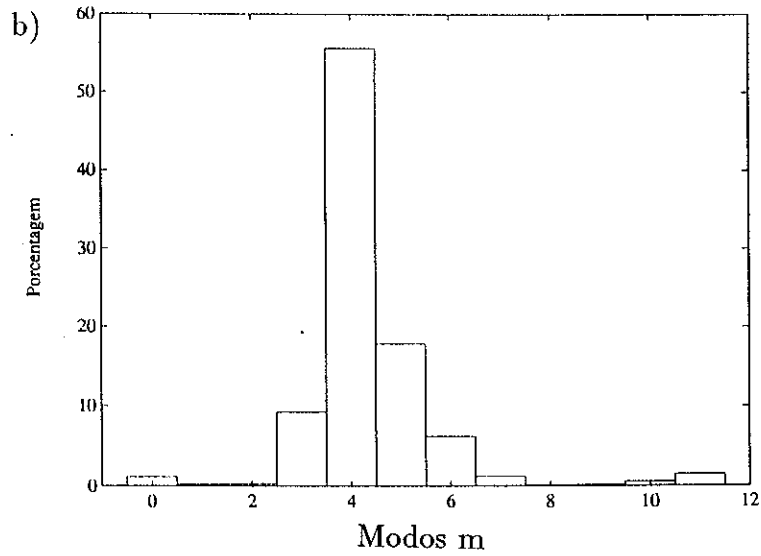
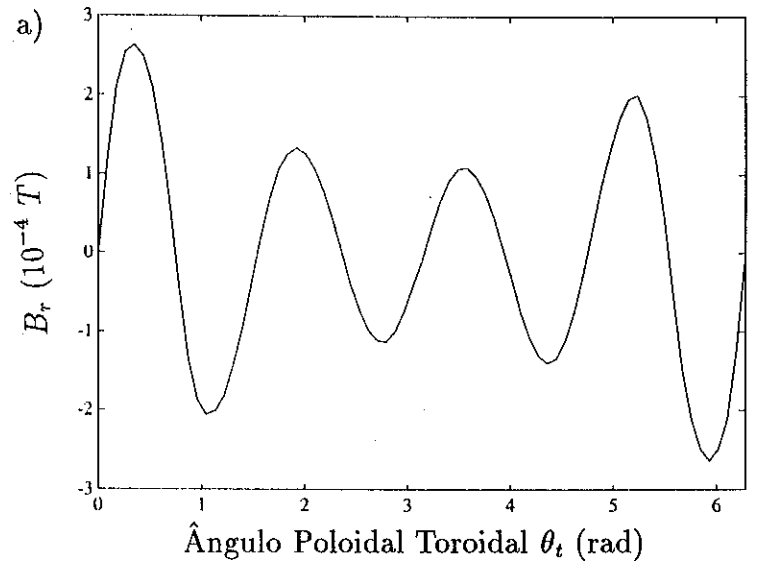


Fig. 10 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 4/1$  em  $\rho_t = 7,0$  cm (a) e sua composição de modos (b).

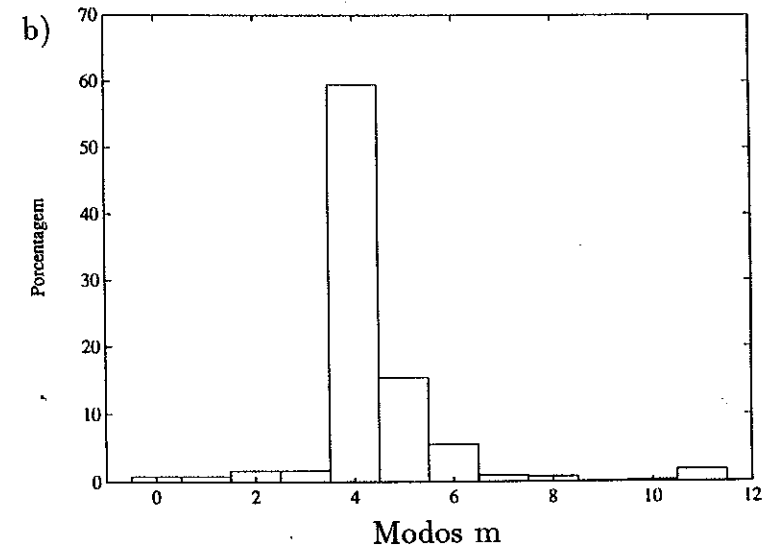
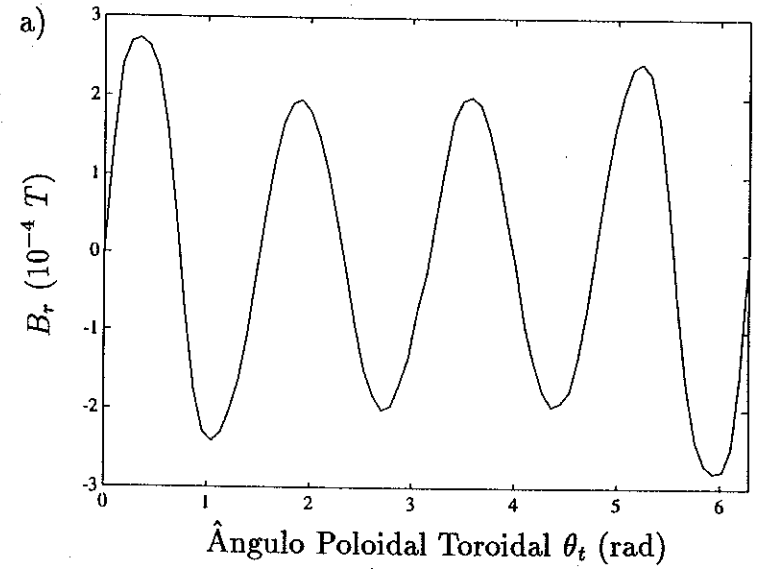


Fig. 11 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 4/1$  em  $\rho_t = 7,73$  cm (a) e sua composição de modos (b).

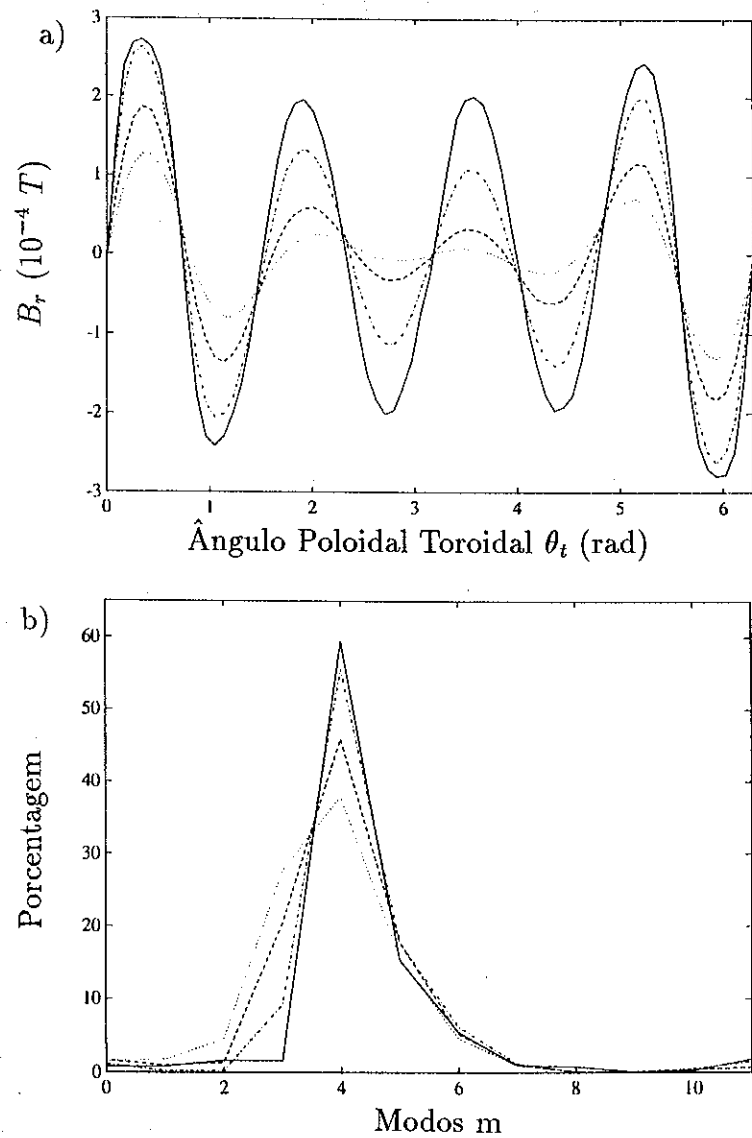


Fig. 12 - Gráfico conjunto dos perfis poloidais de  $B_r$  medidos nas 4 superfícies de  $\rho_t$  constante (a) e suas respectivas composições de modos (b) referentes ao CHR  $m/n = 4/1$ .

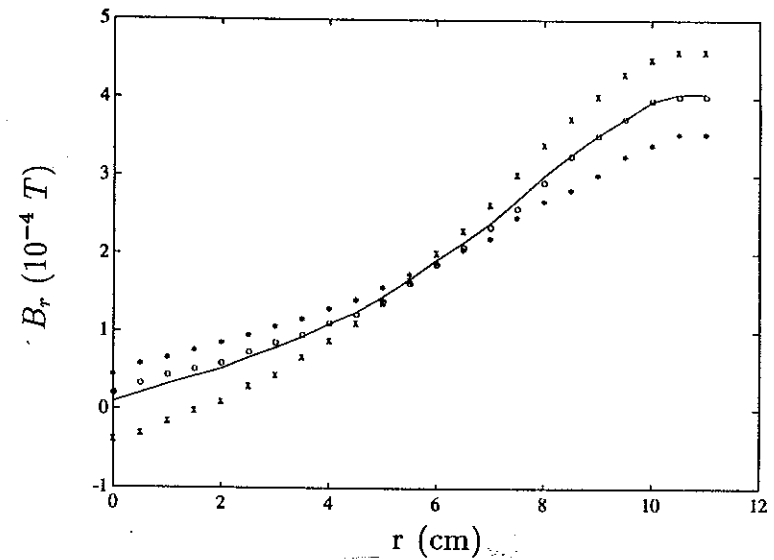


Fig. 13 - Perfil radial de  $B_r$  criado pelo enrolamento do CHR  $m/n = 4/1$ , medido nas posições  $\theta = 65^\circ$  (\*),  $\theta = 145^\circ$  (x) e  $\theta = 330^\circ$  (o). A curva contínua representa a média dos valores obtidos.

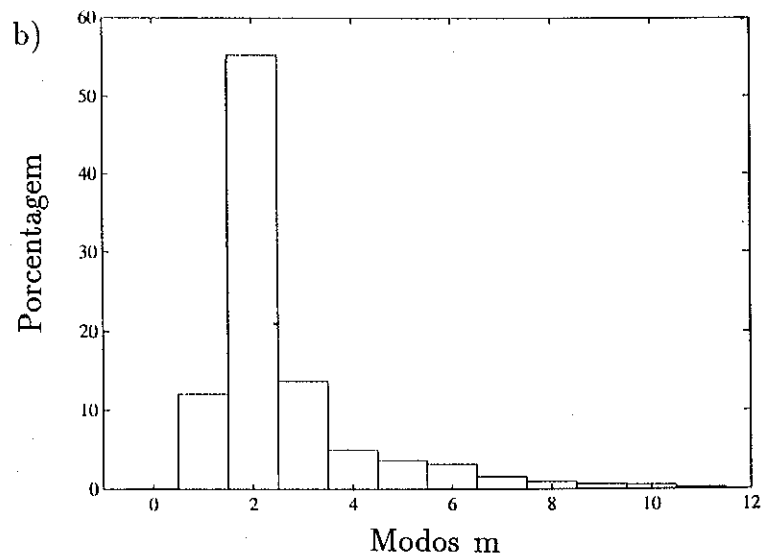
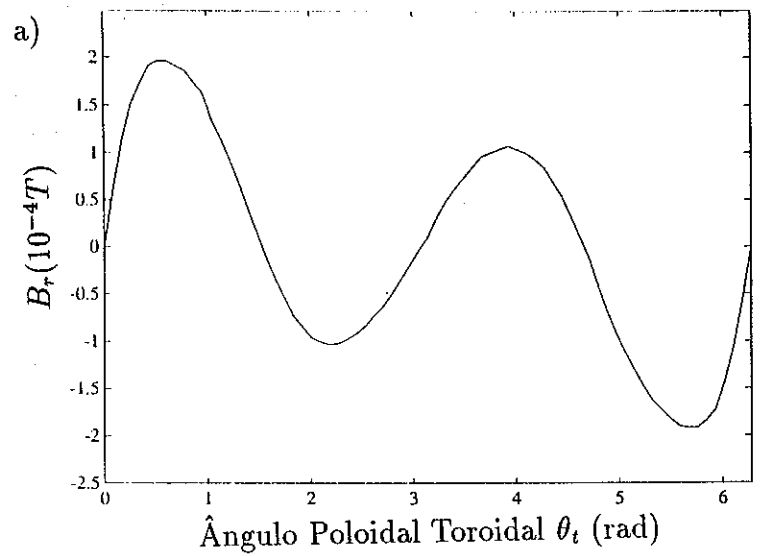


Fig. 14 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 2/1$  em  $\rho_t = 5,0$  cm (a) e sua composição de modos (b).

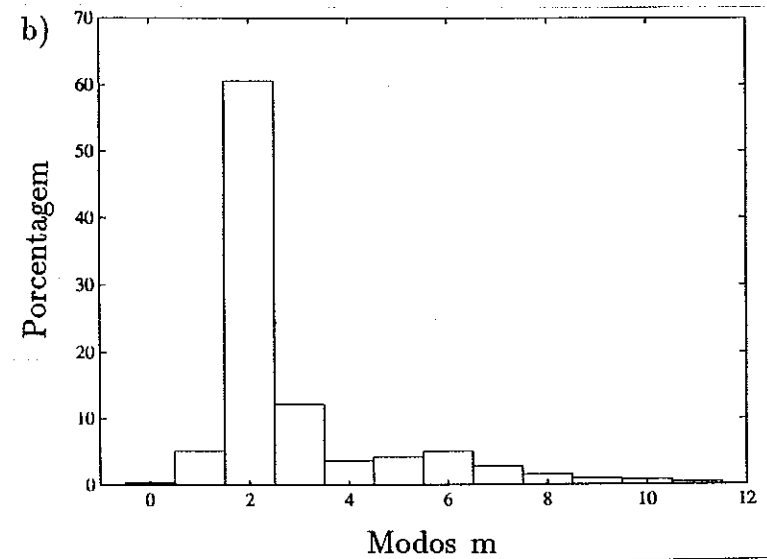
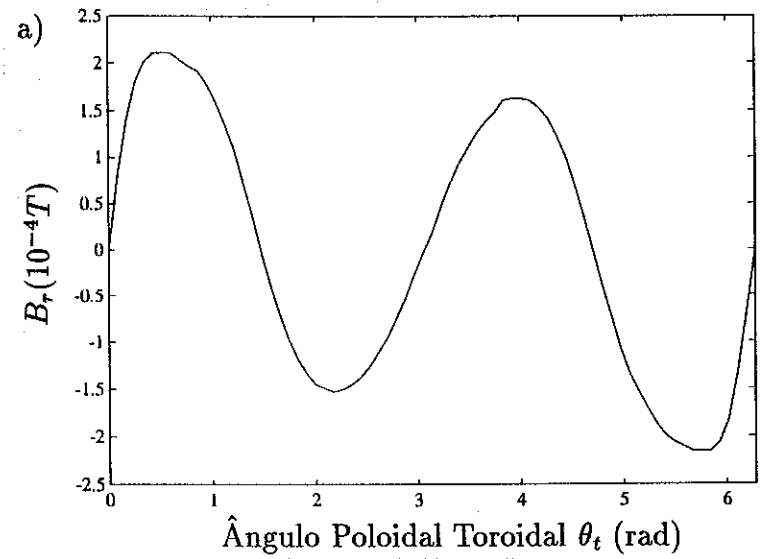


Fig. 15 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 2/1$  em  $\rho_t = 6,0$  cm (a) e sua composição de modos (b).

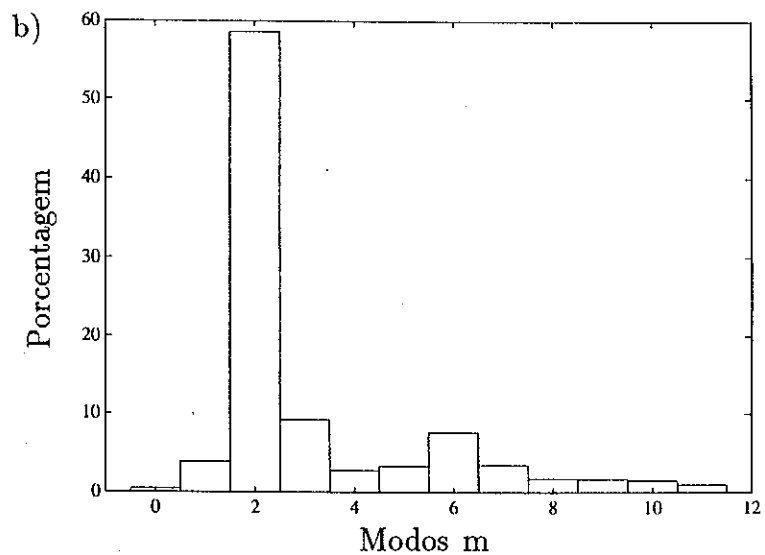
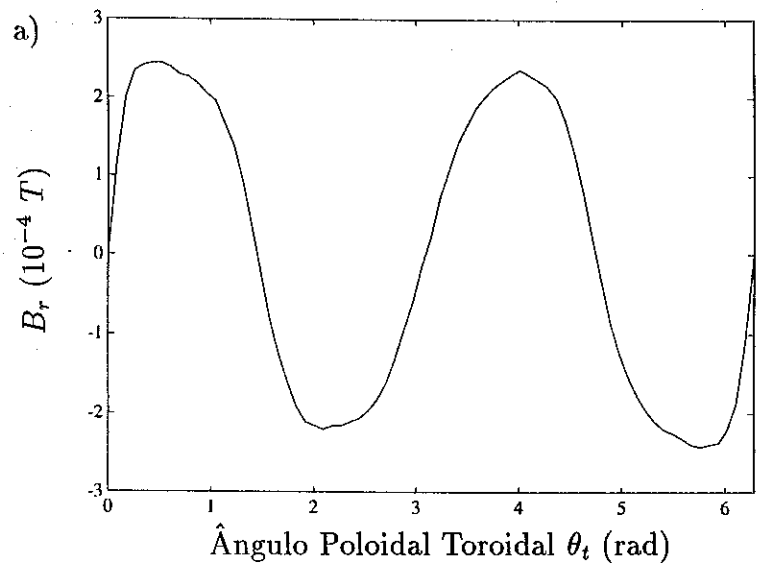


Fig. 16 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 2/1$  em  $\rho_t = 7,0$  cm (a) e sua composição de modos (b).

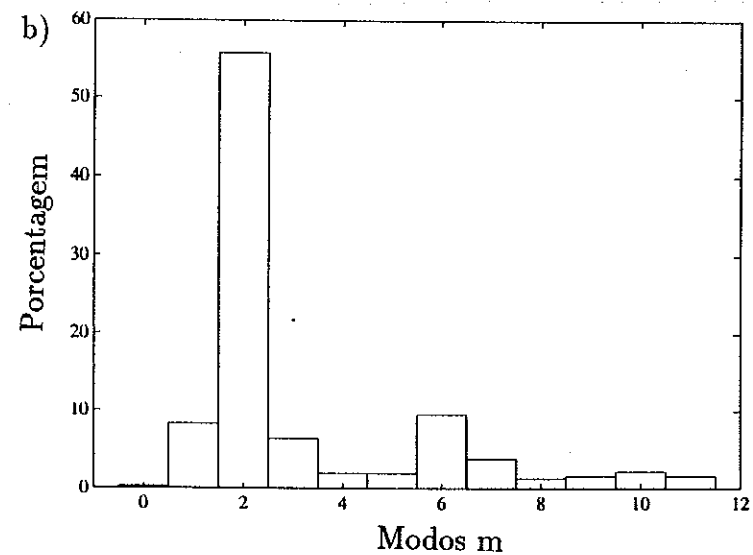
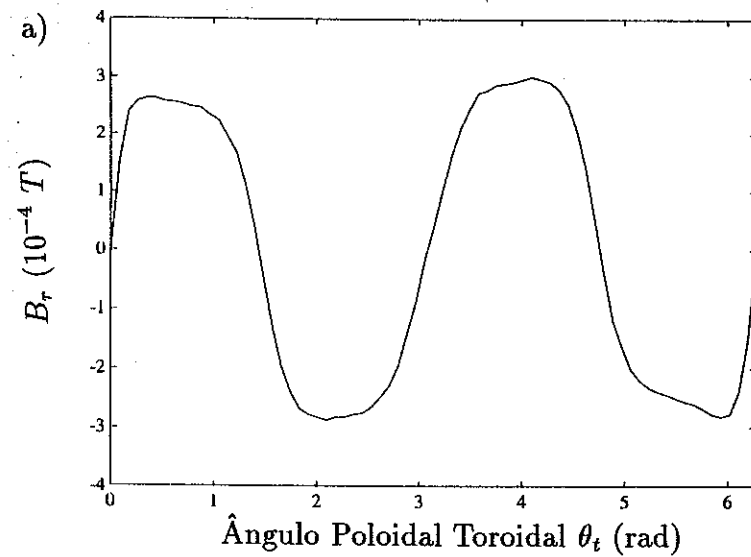


Fig. 17 - Perfil poloidal de  $B_r$  criado pela malha do CHR  $m/n = 2/1$  em  $\rho_t = 7,73$  cm (a) e sua composição de modos (b).

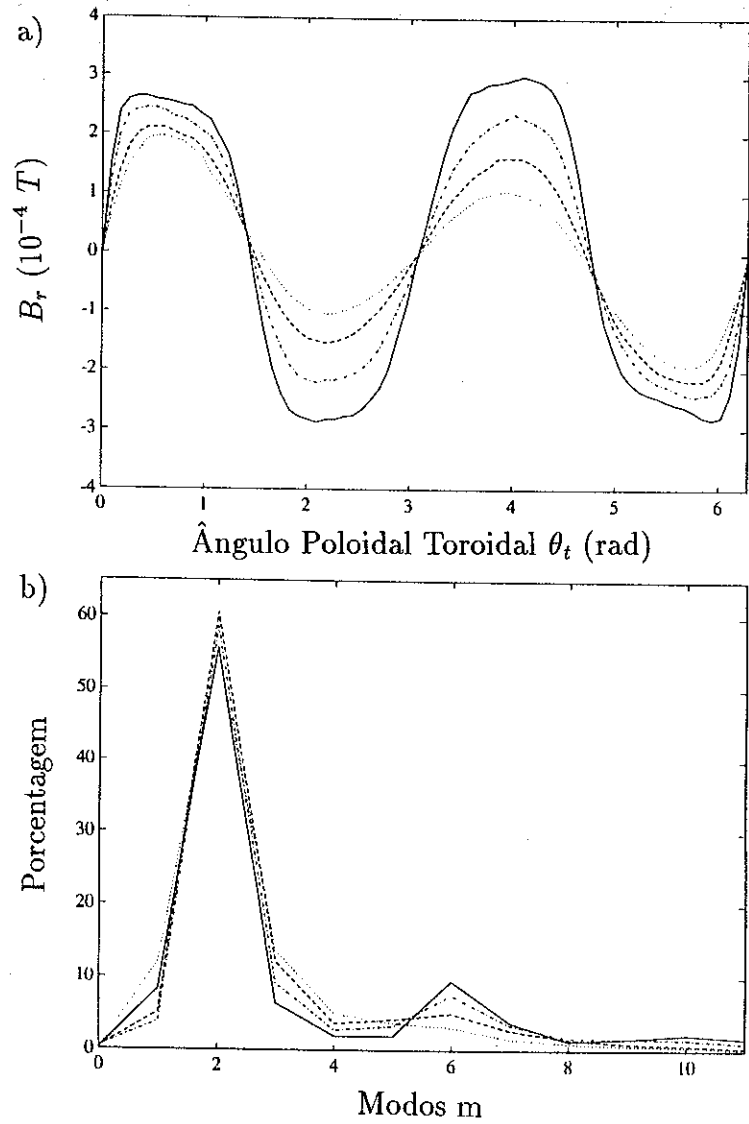


Fig. 18 - Gráfico conjunto dos perfis poloidais de  $B_r$  medidos nas 4 superfícies de  $\rho_t$  constante (a) e suas respectivas composições de modos (b) referentes ao CHR  $m/n = 2/1$ .