

CÁLCULOS COMPUTACIONAIS E DE ENGENHARIA DO PROJETO TOKAMAK BRASILEIRO-II

W.P. de Sá, I.C. Nascimento, A.G. Tuzel, R.M.O. Galvão,

S. Wang¹, Y. Chen¹, R.O. Pauletti², M. Machida
Instituto de Física, Universidade de São Paulo
C.P. 20.516, 01498 São Paulo, SP, Brasil

¹ Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, China

²PROMON

Em trabalhos de projetos e construção de máquinas toroidais, denominadas tokamaks, para o confinamento magnético de plasmas de alta temperatura ($>10^6$ K) são necessários em geral cálculos analíticos e computacionais extensos no sentido de analisar o comportamento hidromagnético e determinar os parâmetros de construção da máquina do ponto de vista de engenharia. O código computacional é desenvolvido utilizando as equações de magnetohidrodinâmica (MHD) e envolve interações de plasma, campo magnético e correntes elétricas que circulam em mais de 20 bobinas distribuídas nas vizinhanças do vaso toroidal do plasma.

O projeto denominado TBR-II, do grupo de plasma do IFUSP, já está pronto e serão apresentados neste simpósio os métodos numéricos utilizados, bem como os acoplamentos eletromagnéticos, térmicos e mecânicos que definem o projeto de engenharia desta máquina.

O TBR-II, considerado um sistema de médio porte nesta área, será alimentado por dois turbo-geradores de 15MW cada um, e deverá ser instalado no IFUSP no próximo ano.

INTRODUÇÃO

Em 1980, o primeiro tokamak brasileiro denominado TBR-I, foi projetado e construído no Laboratório de Física de Plasmas do Instituto de Física da USP⁽¹⁾. Desde então, vários trabalhos teóricos e experimentais foram realizados, incluindo o projeto de construção de um novo tokamak de porte médio denominado TBR-II⁽²⁾.

O tokamak é um sistema que consiste de um vaso metálico toroidal onde o plasma é produzido através de um processo ôhmico e mantido em equilíbrio por interações com campos magnéticos produzidos pelas correntes elétricas que fluem nos condutores ou bobinas colocadas ao redor do vaso metálico. O plasma criado por este método produz partículas carregadas, em geral de hidrogênio, de alta temperatura ($>10^6$ K) e densidade maior que 10^{12} partículas/cm³ balanceadas para fins de obtenção de energia elétrica via fusão termonuclear controlada. Embora este método não esteja dominado por completo, é de se esperar que nos próximos anos a sua viabilidade científica já esteja comprovada nos vários centros de pesquisa internacionais.

O projeto TBR-II, com o seu custo estimado em US\$ 5 milhões, tem por finalidade principal conseguir uma capacidade de construção e operacional de máquinas de porte médio. Neste trabalho iremos apresentar o tratamento computacional que tal projeto exige, e os resultados de simulações que são obtidos através dos códigos desenvolvidos baseados nesta máquina.

ESTUDOS COMPUTACIONAIS NO TBR-II

Os códigos computacionais que suportam a construção do TBR-II, consistem de cerca de vinte programas de pequeno porte que usam pouco tempo de CPU, e podem ser rodados em microcomputadores tipo PC, e um de grande porte denominado código de equilíbrio MHD (EQ code) que necessita de um computador tipo VAX-750 e usa alguns minutos de CPU.

Todos os códigos têm como ponto de partida as dimensões e energias disponíveis no local para a construção da máquina. No caso do TBR-II, teremos à disposição um

laboratório de 100000² é uma fonte energética produzida por dois turbo geradores de 15MW cada um, que irão alimentar um tokamak das seguintes dimensões e parâmetros: (ver figura 1 para visualização dos parâmetros)

Raio maior = $R = 70\text{cm}$

Raio menor = $r = 20\text{cm}$

Elongação = $\epsilon \approx 1.3$

Vaso retangular de 54 por 64 cm

Campo magnético toroidal B_T no centro do vaso = $B_T = 15\text{kG}$

Corrente de plasma toroidal = $I_p = 100\text{kA}$

Duração da descarga = 0.9s

Densidade de plasma esperada = $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$

Temperatura de plasma esperada = $T_e(0) = 400\text{eV}$

Energia total de alimentação = 30MW

Com estes parâmetros iniciais é necessário desenvolver uma simulação real do comportamento da máquina, tanto do ponto de vista científico como de engenharia.

Do ponto de vista de engenharia, os códigos de simulação não são tão extensos; nem mesmo quanto ao tempo de uso de CPU. Entretanto possuem grande quantidade de detalhes que devem ser analisados. Dividimos estes códigos da seguinte forma:

I - Sistema que produz campo toroidal (TF)

- TFMAGFIL - Calcula campos magnéticos na direção toroidal (B_T)
- TFRIPPLE - Calcula a uniformidade do B_T na direção radial
- TFINDUCT - Calcula a indutância das bobinas que produzem B_T
- TFDISPL - Calcula o deslocamento produzido nas bobinas
- TFFORC1 - Calcula a força de interação entre B_T e as bobinas poloidais
- TFFORC2 - Calcula a força de interação entre B_V e bobinas poloidais
- TFFORC3 - Calcula a força de interação no caso de um curto-circuito
- TFFEMRIS - Calcula a variação temporal das temperaturas nos condutores elétricos que produzem B_T e do sistema de refrigeração destes condutores

II - Sistema que produz campo poloidal (PF)

- PFFEMRIS - Calcula a variação temporal das temperaturas nos condutores elétricos que produzem B_p e do sistema de refrigeração destes condutores
- PFFIFL1 - Calcula o fluxo do campo magnético poloidal e índice de curvatura do campo vertical
- PFFIFL2 - Calcula o campo magnético poloidal na direção R e Z
- PFFIFL3 - Calcula os valores do campo magnético horizontal
- PFFORC1 - Calcula as forças eletromagnéticas radial e axial nas bobinas que geram o campo poloidal
- PFFPARA1 - Calcula a auto-indutância de cada uma das bobinas do campo poloidal B_p
- PFFPARA2 - Calcula a indutância mútua entre duas bobinas do campo poloidal B_p
- PFFPARA3 - Calcula a indutância mútua total entre diferentes bobinas de B_p
- PFFOHOP2 - Calcula a otimização do fluxo magnético produzido por bobinas do OH para a produção da corrente de plasma I_p

- PFEFOPT - Calcula a otimização das bobinas para a estabilização da coluna de plasma

III - Código que analisa o equilíbrio magnetohidrodinâmico (MHD) do TBR-II

- EQ code - Código extenso, incluído em tempo de CPU, que mostra as configurações de equilíbrio possíveis utilizando os dados dos demais códigos computacionais

O campo toroidal (B_T) é produzido por bobinas ou condutores elétricos na direção poloidal. Enquanto os campos poloidais (B_P) são produzidos por várias bobinas, sistema ôhmico (OH), sistema vertical (VF), sistema horizontal (HF) e sistema de molde (SF), cujos condutores são todos direcionados na direção toroidal. As posições relativas de cada um dos condutores são mostrados na figura II.

Exponemos a seguir, os fundamentos básicos dos códigos apresentados na lista acima.

1 - Sistema que produz campo toroidal (TF)

Códigos: TFMAGFIL, TFRIPPLE e TFINDUCT

O tokamak TBR-II utiliza bobinas na forma retangular para a geração de campo toroidal (B_T), dispostas toroidalmente em 16 seções de 4 voltas por seção perfazendo um total de 64 bobinas. A corrente máxima será de 82kA que produzirá um campo toroidal de 15kG no centro geométrico da bobina retangular. Para o estudo computacional, cada bobina é constituída de quatro seções, três seções retangulares na parte superior, inferior e do lado externo, e uma seção trapezoidal interna ao núcleo do tokamak.

As componentes do campo magnético são obtidas das equações de Maxwell em coordenadas cilíndricas e utilizando o vetor potencial $A^{(3)}$:

$$B_R = \frac{1}{R} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \quad (1)$$

$$B_\theta = \frac{\partial A_R}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial R} \quad (2)$$

$$B_z = \frac{1}{R} \left[\frac{\partial}{\partial R} (R A_\theta) - \frac{\partial A_R}{\partial \theta} \right] \quad (3)$$

O código TFMAGFIL calcula a distribuição das componentes do campo magnético no plano equatorial em dois casos. O primeiro consiste no cálculo da distribuição do campo no plano médio da bobina na direção toroidal; o segundo no cálculo da distribuição do campo magnético no plano médio entre duas bobinas adjacentes.

Nestes cálculos, cada bobina é desmembrada em seis pares, 2 elementos horizontais, 2 elementos radiais, um elemento vertical interno e outro elemento vertical externo.

Utilizando as mesmas equações, a ondulação ou "ripple" foi calculada por um código denominado TFRIPPLE que nos fornece o seu valor máximo absoluto em várias posições radiais de acordo com a equação:

$$A = \frac{2 | B_{\max} - B_{\min} |}{B_{\max} + B_{\min}} \cdot 100 \quad (4)$$

Um outro código desenvolvido é o TFINDUCT que calcula as indutâncias das bobinas toroidais retangulares, usando o método de integração da energia magnética de acordo com:

$$L = \frac{\int B^2 \Delta V}{\mu_0 I^2} \quad (5)$$

Códigos: TFDISPL, TFFORC1, TFFORC2 e TFFORC3

Estes códigos são utilizados para o estudo de forças de deslocamento e tensão nas bobinas toroidais de forma retangular.

Estas forças aparecem devido à interação de campo toroidal B_T com as correntes em bobinas do campo toroidal no mesmo plano da bobina. Deve-se notar que o campo magnético na parte interna da bobina é mais forte do que na parte externa, e que durante a condição de operação normal com campo de 15kG, aparecerá uma força central de 1235kN agindo em cada bobina que será, no TBR-II, suportada por uma coluna de fibra de vidro como é mostrado na figura 1b.

Além disso, deveremos também considerar as forças perpendiculares às bobinas devido à interação dos campos verticais e de molde, com a corrente nas bobinas do campo toroidal. Estas forças tendem a tombar as bobinas e devem ser analisadas cuidadosamente no cálculo do suporte da estrutura. Para uma corrente de plasma de 100kA, o torque de tombamento é de 15.2kNm por bobina.

Associada a todas estas forças, deve-se também levar em conta a condição de atuação das forças em cada uma das bobinas, no caso de uma delas entrar em curto circuito. Isto é, assumimos que a corrente em uma das bobinas é nula, e mantemos nas demais as mesmas condições normais de operação. Nesta situação aparecerá uma força lateral máxima de 496N em cada uma das bobinas vizinhas à que foi curto circuitada. Na figura IV são mostradas estas forças agindo em cada uma das bobinas do campo toroidal.

Portanto, foram desenvolvidos três códigos: TFFORC1, TFFORC2 e TFFORC3, que se destinam, respectivamente, aos cálculos de força de interação entre campo toroidal e bobinas do campo toroidal, força de interação entre campos verticais e de molde e corrente em bobinas do campo toroidal, e a força de interação no caso de curto circuito em uma das bobina do campo toroidal.

Os resultados destes 3 códigos são utilizados como dados de entrada do código TFDISPL, para a análise de força de deslocamento e tensão utilizando o método de elementos finitos.

Os valores do momento de torção, tensão e deslocamento devido às cargas no plano, foram calculados usando método analítico desenvolvido por F. Holmann⁽⁴⁾:

$$f_c(Z) = \alpha \xi_1(Z)$$

onde:

$f_c(Z)$ é a força exercida na coluna interna da bobina

α é a constante de proporcionalidade

$\xi_1(Z)$ é a força de deslocamento

A constante de proporcionalidade α pode ser calculada usando

$$\sigma = \frac{2\pi E}{n(1 - \nu - 2\nu^2)}$$

onde:

E = módulo de elasticidade
 ν = razão de Poisson
 n = número de voltas da bobina

A tensão máxima na bobina de cobre, que sob condições normais de operação chega a 52N/mm^2 , se estabelece no canto superior e inferior interno da mesma.

Na figura III são mostradas as forças internas que agem no condutor poloidal que produz o campo toroidal B_T , e na figura IV temos as forças laterais de tombamento que agiriam em cada bobina poloidal caso uma delas fosse curto circuitada durante a operação da máquina.

Códigos: TFTEMIS e PFTEMIS

Estes programas foram desenvolvidos para nos fornecerem a variação temporal, (durante a operação da máquina), da temperatura do condutor de cobre e do sistema de refrigeração com água que flui nos condutores elétricos para geração de campos toroidais e poloidais.

Foi utilizado um modelo unidimensional, considerando a condutância de calor no condutor e transferência de calor de cobre para água, com duas equações diferenciais parciais:

para o cobre:
$$SC\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = s\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + SQ - h\mu(\theta - \theta_a) \quad (6)$$

para a água:
$$S_a C_a \gamma_a \left[\frac{\partial \theta_a}{\partial t} + V_a \frac{\partial \theta_a}{\partial X} \right] = h\mu(\theta - \theta_a) \quad (7)$$

onde:

S é a seção de corte do condutor em cm^2

S_a é a seção de corte do canal de água em cm^2

C é o calor específico do condutor em $\text{cal/g}^\circ\text{C}$

C_a é o calor específico da água em $\text{cal/g}^\circ\text{C}$

γ é a densidade volumétrica do condutor em g/cm^3

γ_a é a densidade volumétrica da água em g/cm^3

Q é a quantidade de calor por unidade de volume por unidade de tempo;

$\text{cal/cm}^3\text{seg}$

h é o coeficiente de transferência de calor em $\text{cal/cm}^2\text{seg}^\circ\text{C}$

μ é 2π onde r é o raio do condutor de água em cm

V_a é a velocidade de fluxo de água em cm/seg

θ é a temperatura do condutor em $^\circ\text{C}$

θ_a é a temperatura da água em $^\circ\text{C}$

As equações 6 e 7 são resolvidas utilizando condições iniciais no tempo $t = 0$ e

X = 0 com temperaturas de cobre e água de 35°C. O resultado deste código é mostrado na figura V.

II - Sistema que produz campo poloidal (PF)

O último código apresentado PFTMRIS e os demais códigos a seguir são todos referentes aos cálculos relacionados às componentes que geram o campo poloidal.

O sistema de campo poloidal do TBR-II é composto por bobinas de aquecimento ôhmico (OH), campo vertical (VF), campo de molde (SF) e campo horizontal (HF), todas estas componentes são colocadas juntas para os estudos das distribuições de campos, tensões mecânicas e otimização na obtenção da corrente de plasma.

Códigos: PFFIFL1, PFFIFL2 e PFFIFL3

Estes códigos são utilizados para calcular o campo magnético em relação as posições R e Z, o fluxo do campo magnético Ψ e o índice de curvatura do campo vertical n. As fórmulas básicas são o fluxo magnético e a intensidade do campo nas direções radial e axial produzidos por um condutor circular de uma volta. Estas fórmulas são dadas na forma de séries das integrais elípticas:

$$\Psi = \frac{8\pi}{10} I \sqrt{\frac{RR'}{k^2}} \left[1 - \frac{k^2}{2} K(k^2) - E(k^2) \right]$$

$$B_r = \frac{2I}{10R} \frac{Z - Z'}{[(R' + R)^2 + (Z - Z')^2]^{1/2}} \left\{ -K + \left[\frac{R'^2 + R^2 + (Z - Z')^2}{(R' - R)^2 + (Z - Z')^2} \right] E \right\}$$

$$B_z = \frac{2I}{10R} \frac{1}{[(R' + R)^2 + (Z - Z')^2]^{1/2}} \left\{ K + \left[\frac{R'^2 - R^2 - (Z - Z')^2}{(R' - R)^2 + (Z - Z')^2} \right] E \right\}$$

$$n = -\frac{R}{n_z} \frac{\partial B_z}{\partial R}$$

onde

R', Z' são as coordenadas das bobinas na direção radial e axial em cm
R, Z são as coordenadas dos pontos no espaço onde os campos magnéticos

são produzidos

$$k^2 = \frac{4RR'}{(R' + R)^2 + (Z - Z')^2}$$

$$H = 1 - k^2$$

$$K(k^2) = \left\{ a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 \right\} + \left\{ b_0 + b_1 H + b_2 H^2 + b_3 H^3 \right\} \ln \left(\frac{1}{H} \right)$$

$$E(k^2) = \left\{ 1 + a_0 + a_1' H + a_2' H^2 + a_3' H^3 \right\} + \left\{ b_1' H + b_2' H^2 + b_3' H^3 \right\} \ln \left(\frac{1}{H} \right)$$

a_0, b_0, a_1', b_1' são constantes numéricas

O código PFFIFL1 calcula o fluxo magnético Ψ e o índice de curvatura n , enquanto que o PFFIFL2 se destina ao cálculo do campo magnético em cada ponto da área de campo. O PFFIFL3 calcula o campo magnético horizontal que deve ser ajustado a um valor próximo de zero para que o equilíbrio da coluna de plasma possa ser mantido estável (como é mostrado na figura VI).

Código: PFFORC1

Este código é usado para o cálculo das forças eletromagnéticas radial e axial que agem nas bobinas do campo poloidal sob diferentes condições de trabalho. As equações básicas destas forças, provêm dos produtos das componentes radial e axial dos campos magnéticos produzidos pela corrente em um circuito circular de uma volta, com a corrente em um outro circuito circular.

Os circuitos de corrente estudados são de OH, VF, SF e de plasma. Durante a operação, as forças eletromagnéticas que agem nas bobinas deverão mudar ao longo do pulso. Há sete tipos de condições de trabalho para realizar este estudo. O primeiro tipo é a "Fase de formação da bobina OH", onde as bobinas OH são carregadas ao valor máximo positivo, e as demais correntes dos VF, SF e de plasma são consideradas nulas. O segundo tipo é a "Fase de formação do plasma circular", em que as correntes OH e SF se reduzem a zero e as do VF e de plasma atingem o valor máximo. O terceiro tipo é a "Fase plana do plasma circular", onde a corrente em OH atinge o seu valor máximo negativo junto com os máximos do VF e de corrente de plasma. Consideramos nesta fase a corrente do SF nula. O quarto tipo é a "Disrupção do plasma circular". Nesta fase as correntes são as mesmas que no caso anterior (terceiro tipo), porém a corrente de plasma é considerada nula. Os tipos 5, 6 e 7 são similares aos tipos 2, 3 e 4, porém com forma de plasma não circular devido a existência da corrente nas bobinas de molde (SF). Nestes tipos a corrente em SF possui o valor máximo e os demais valores são mantidos iguais aos de cada tipo.

Para bobinas que geram aquecimento ôhmico (OH), o do primeiro tipo é o que oferece maior perigo, chegando a um valor da força vertical F_y de 202kN em duas bobinas ôhmicas (OH). Para as bobinas SF o mais perigoso é o do sexto tipo de operação, que produz uma força vertical de 50kN em duas das quatro bobinas existentes.

Códigos PFPARA1, PFPARA2 e PFPARA3

Os três códigos PFPARA1, 2 e 3 foram desenvolvidos para o cálculo da autoindutância e indutância mútua das bobinas que geram o campo poloidal.

O código PFPARA1 calcula a autoindutância de cada sistema de bobinas.

campo poloidal. PFPARA2 destina-se ao cálculo da indutância mútua entre dois conjuntos de bobinas do campo poloidal. E PFPARA3 calcula todas as indutâncias mútuas entre diferentes conjuntos de bobinas do campo poloidal.

As equações básicas para as indutâncias são as seguintes:

- auto indutância de uma bobina de forma retangular

$$L = \mu_0 R \left[\ln \left(\frac{8R}{a+r} \right) - 0.5 \right]$$

onde:

R é o raio médio da bobina e

a e r são as dimensões da bobina nas direções axial e radial respectivamente

- indutância mútua entre duas bobinas circulares coaxiais

$$M = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K - \frac{2}{k} E \right]$$

onde:

$$k^2 = \frac{4R_1 + R_2}{(R_1 + R_2)^2 + X^2}$$

em que R_1 e R_2 são os raios das duas bobinas, X é a distância vertical entre duas bobinas e K e E são aproximações polinomiais das integrais elípticas do tipo:

$$K(m) = \left\{ a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + a_3 m^3 \right\} + \left\{ b_0 + b_1 m + b_2 m^2 + b_3 m^3 \right\} \ln \left(\frac{1}{m} \right)$$

$$E(m) = \left\{ 1 + a'_1 m + a'_2 m^2 + a'_3 m^3 \right\} + \left\{ b'_1 m + b'_2 m^2 + b'_3 m^3 \right\} \ln \left(\frac{1}{m} \right)$$

Nestes códigos as simetrias das bobinas foram usadas para economizar o tempo de cálculo. As indutâncias da bobina foram obtidas na forma de matriz, de maneira que os valores da diagonal representassem as auto indutâncias, e os demais valores as indutâncias mútuas entre diferentes combinações de bobinas. Obtemos assim, a indutância total do sistema poloidal em forma matricial em unidades de mH, como visto abaixo:

	OH	VF	SF	HF	PL
OH	6.07	0.16	0.88	0	0.04
VF	0.16	0.36	0.038	0	-0.002
SF	0.88	0.038	0.37	0	0.0074
HF	0	0	0	0.65	0
PL	0.04	-0.002	0.0074	0	1.61

Código PFOHOP2

As bobinas de aquecimento ôhmico produzem a corrente de plasma por meio de ação de transformador. Estas bobinas são projetadas de modo a produzir um fluxo magnético total específico no plano da área de seção do plasma, e gerar um campo elétrico necessário para produzir uma corrente de plasma. As bobinas do OH são compostas por um solenóide central e três pares de bobinas de compensação. Do ponto de vista de engenharia, efetua-se a otimização de um sistema através da análise das suas condições geométricas e paramétricas. Existem em geral, várias combinações dos parâmetros que podem levar a uma otimização de um sistema. No nosso caso, desenvolvemos um código de otimização em que o campo magnético espúrio é mínimo na região do plasma, dentro das condições geométricas impostas (ver figura 11). Os limites impostos residem na intensidade do campo espúrio, que deve ser menor do que 15G para o plasma circular e menor do que 20G para plasma alongado. Caso estes limites não sejam satisfeitos, são sugeridas pequenas variações dos parâmetros, e obtidas várias combinações possíveis. Estas combinações são comparadas de modo a selecionar as de menor campo espúrio e considerando a dificuldade de construção das bobinas, bem como consumo mínimo de energia e utilização mínima de material da bobina.

Código: PFEFOP1

Este código de otimização para bobinas de campo de equilíbrio (HF) é similar às das bobinas OH. A diferença está nos valores exigidos para cada ponto no plasma. Para a otimização das bobinas OH, a intensidade do campo nas mesmas deveria ser minimizada dentro do volume de plasma. No caso de otimização das bobinas de equilíbrio, a condição imposta sobre a direção e a magnitude do campo magnético dentro do volume do plasma.

O código PFEFOP1 trabalha de maneira diferente de acordo com o tipo de código de equilíbrio utilizado. Se o código de equilíbrio for de contorno fixo, o campo de equilíbrio é pré-determinado, e o código PFEFOP1 é utilizado para determinar as posições e corrente por volta de cada bobina. Caso as posições das bobinas precisem ser definidas de acordo com os acessos para os diagnósticos, usamos um código de equilíbrio de contorno livre que verifica o equilíbrio com esta configuração de campo pré-estabelecida pelas bobinas fixas. Neste caso, o código PFEFOP1 usa esta configuração de campo. Para o TBR-II optamos pela segunda alternativa, utilizando um código de equilíbrio de contorno livre chamado EQ.

III - Código EQ - Equilíbrio MIID do TBR-II

O problema de equilíbrio em um sistema axisimétrico toroidal consiste em resolver uma equação diferencial parcial elíptica para a função de fluxo poloidal $\Psi(X,Z)$, sujeito às condições de contorno apropriadas fora do plasma. Para o TBR-II utilizamos o código de equilíbrio bidimensional com contorno livre e a equação de Grad-Shafranov em forma iterativa⁽⁵⁾.

O problema é facilmente resolvido quando nós prescrevemos a pressão $p(\Psi)$ e uma função do campo toroidal $g(\Psi)$ tal que $B_\phi = R B_0 g(\Psi)/X$, sendo B_0 o campo toroidal no vácuo em um raio arbitrário R , produzido por bobinas externas. As coordenadas utilizadas neste código foram as cilíndricas (X,ϕ,Z) (como visto na figura 1).

As equações iniciais são equações MHD para o equilíbrio de forças, dadas por:

$$\nabla p = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad \text{Força de Lorentz} \quad (8)$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B} \quad \text{Lei de Ampere} \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Divergência do campo B} \quad (10)$$

que devido a configuração axisimétrica podem ser escritas na forma:

$$\bar{B} = \frac{1}{2\pi} \nabla\phi = \nabla\psi + RB_0 q \nabla\psi \quad (11)$$

onde:

$\psi = \frac{1}{2\pi} \int \bar{B} \cdot \nabla\psi \, d\tau$ é o fluxo magnético poloidal entre os eixos de simetria e a superfície magnética de interesse. O fluxo magnético ψ está relacionado às componentes do vetor potencial magnético \bar{A} por:

$$\psi = 2\pi A_\phi \quad (12)$$

A equação de equilíbrio obtida das relações acima resulta em:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\frac{1}{X} \frac{\partial \psi}{\partial X} \right] - \frac{1}{X} \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} = 2\pi J_\phi \quad (13)$$

$$\text{com } J_\phi = -2\pi \left[X \frac{dp}{d\psi} + \frac{R^2 B_0^2}{2X} \frac{dg^2}{d\psi} \right] \quad (14)$$

Portanto o código de equilíbrio é um código que resolve a equação diferencial parcial (13) com condições de contorno e algumas suposições apropriadas, tais como:

a) Os valores do fluxo no contorno são compostos de duas partes:

$$\psi_b = \psi_b^{\text{bobina}} + \psi_b^{\text{plasma}}$$

b) A distribuição de corrente J_ϕ é uma função de ψ com p e g assumindo a forma:

$$p = p_0 \psi^\alpha \quad \text{e} \quad g = 1 - \gamma \psi^\beta$$

onde α e β são parâmetros de entrada pré-determinados

c) Os limitadores sólidos são especificados no programa como sendo linhas retas dentro do vaso de vácuo, e a interface plasma vácuo é definida como sendo o primeiro contorno de ψ mínimo que está em contato com qualquer limitador.

d) O código possui duas malhas de controle; uma interna e outra externa. A malha interna calcula os valores dos fluxos dentro do contorno, e a malha externa calcula o fluxo no contorno do domínio definido pelo ψ mínimo (ver figura VII).

O código EQ foi utilizado considerando-se perfis de corrente e pressão parabólicas, com os quais obtivemos várias configurações de equilíbrio de plasma.

A primeira configuração obtida, usada como ponto de partida, foi a do tipo circular. A superfície de fluxo magnético obtida neste caso é mostrada na figura VIII, onde um plasma circular de 100kA de corrente, é mantido com corrente de 7.1kA nas bobinas de campo vertical, e de 82kA nas bobinas de campo toroidal.

Com uma variação nas correntes das bobinas verticais e de molde, podemos, a partir da configuração circular, mudar este formato de plasma para configurações alongadas ou em forma de "D". Na figura IX podemos ver o caso do tipo "D", com alongação de 1.295. No caso de plasmas alongados, a corrente nas bobinas de molde pode chegar a 6.6kA. Estamos atualmente testando outras configurações de modo a obter informações sobre possíveis modos de operação desta máquina.

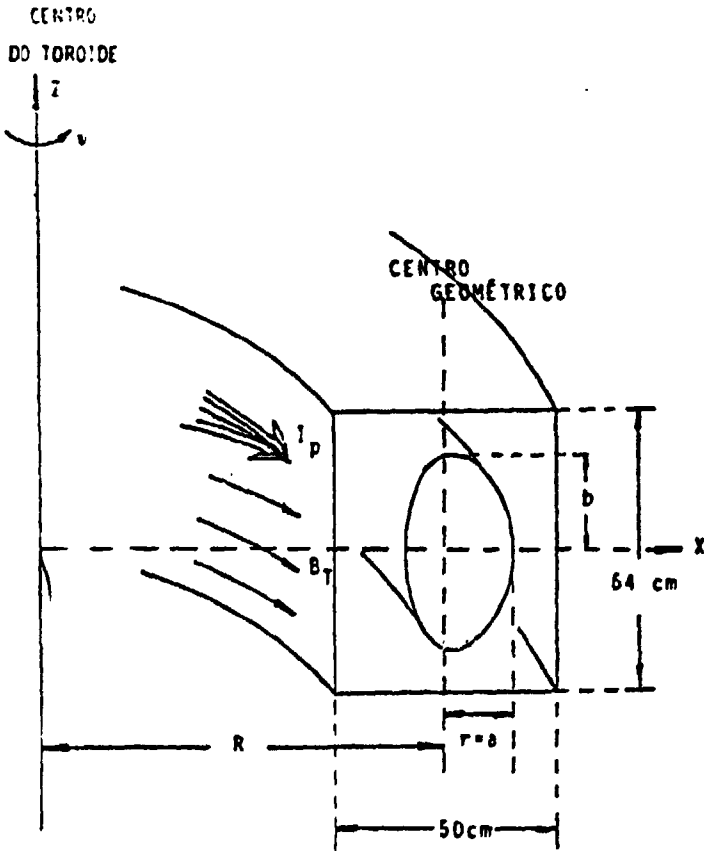
CONCLUSÃO

Em conclusão, para se construir um tokamak de médio porte, o uso de vários códigos computacionais para simular a formação e equilíbrio do plasma, assim como a análise estrutural das bobinas são os primeiros passos para se ter uma idéia da máquina. Os códigos aqui apresentados, representam um trabalho de mais de um ano no desenvolvimento computacional do grupo com a ajuda de dois cientistas chineses. Embora muitas modificações para melhorar os códigos possam ainda ser efetuadas, consideramos que os trabalhos realizados até o momento nos fornecem bases sólidas para o início da construção de um novo tokamak no BRASIL.

REFERÊNCIAS

- (1) - Projeto TBR-I.
Projeto TBR - Tokamak de Pequeno Porte,
S.W. Simpson, I.C. Nascimento, R.M.O. Galvão, et al
LFP-1, Inner Report, 1977,
Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

Design of the TBR Tokamak,
S.W. Simpson, I.C. Nascimento, R.M.O. Galvão, et al
IFUSP/P-155 (LFP-2), Inner Report, 1978,
Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
- (2) - Projeto TBR-II.
Parameter Study of the Design of TBR-II,
R.M.O. Galvão and A. Tuxzel, Inner Report.
- (3) - Calculation of the Magnetic Field and Eletromagnetic Field of the Rectangular, Toroidal Field Coil,
Wang Shaohua, Inner Report, pag 31, 1983,
Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, China.
- (4) - TCA Toroidal Field Coil Design and Analysis,
F. Hofmann, pag.38, Dec 1977, INT 86/87,
Centre de Recherches en Physique des Plasmas,
Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- (5) - Numerical Determination of Axisymmetric Toroidal Magnetohydrodynamic Equilibrium,
J.L. Johnson, H. E. Palhed et al, pag 212-234, 1979,
Jornal of Computational Physics.



Raio maior: R

Raio menor: r

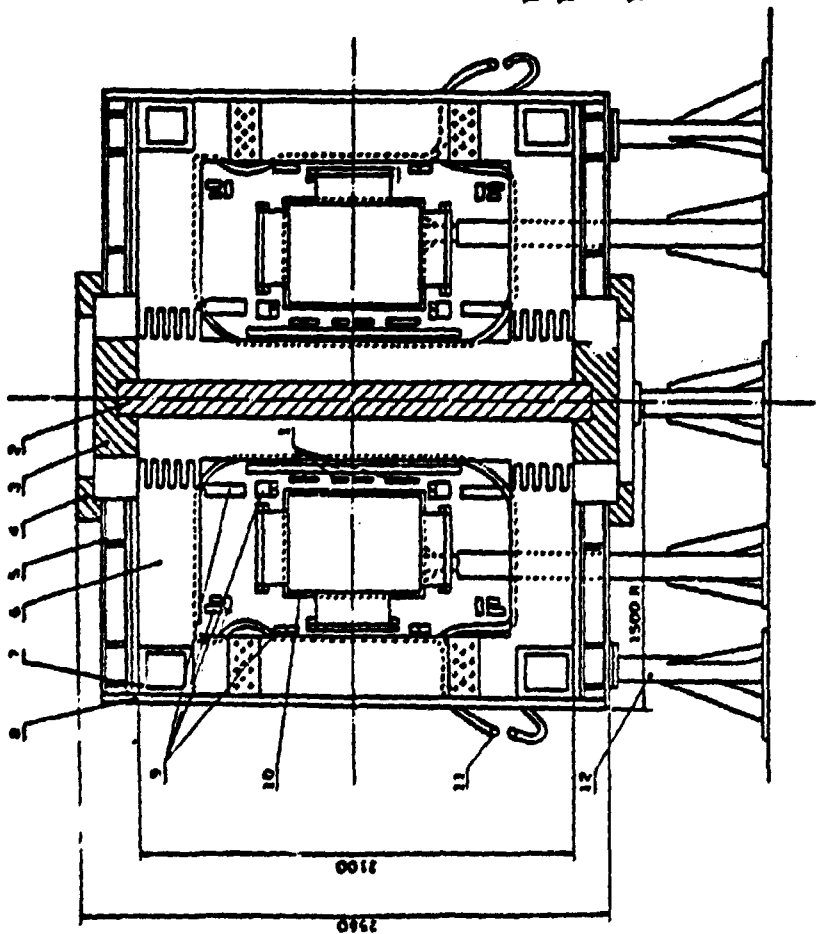
Elongação: b/a

Vaso retangular de 50 x 64cm

Campo magnético toroidal no eixo: B_T

Corrente de plasma: I_p

Fig. 1a - Coordenadas do tokamak.



- 1 - Bobinas do campo poloidal.
- 2 - Coluna central.
- 3 - Tampões superiores e inferiores.
- 4 - Coroas superiores e inferiores.
- 5 - Discos superiores e inferiores.
- 6 - Bobinas do campo toroidal.
- 7 - Blocos de calço.
- 8 - Esquadrias de contorno.
- 9 - Bobinas do campo poloidal.
- 10 - Câmara de vácuo.
- 11 - Condutores de água para resfriamento.
- 12 - Pés de suporte.

Fig. 1b - Visão geral do projeto TBR-II.

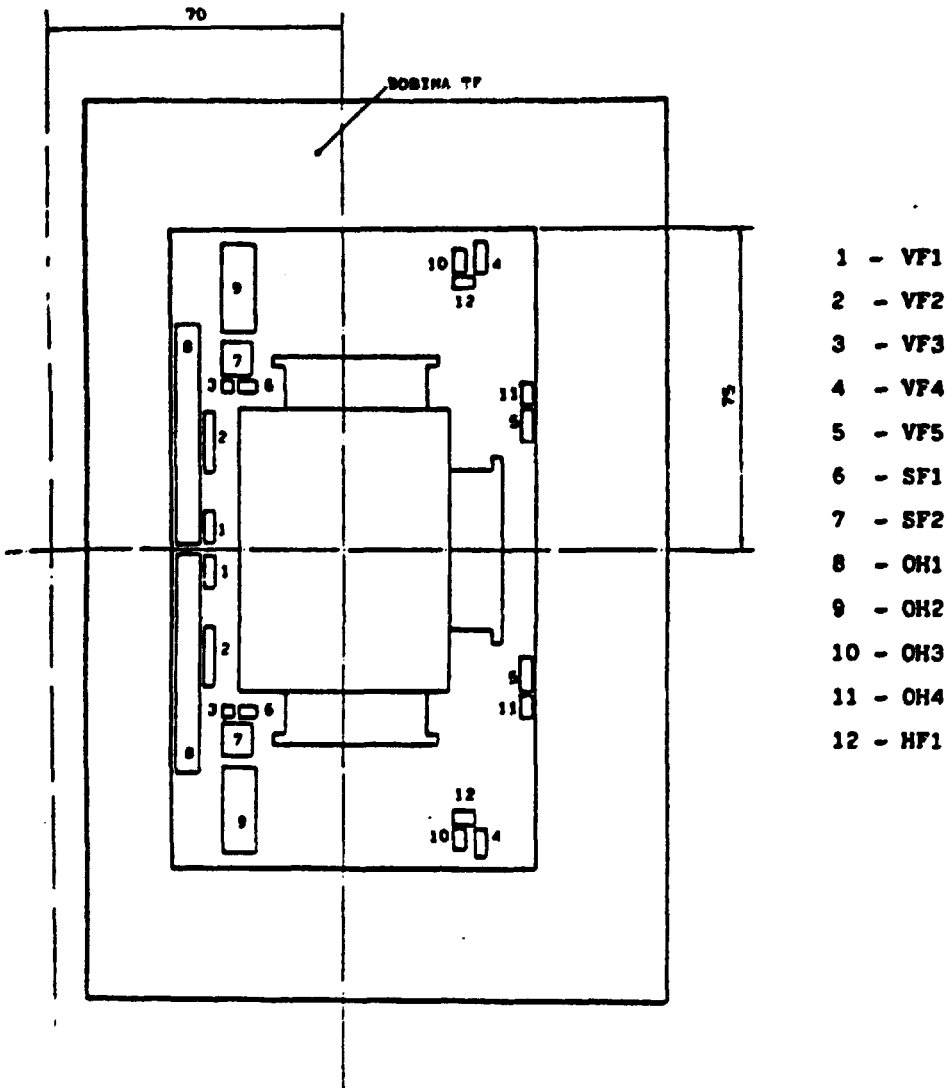


Fig. II - Posição relativa das bobinas ao BR-II, onde temos: sistema Ôhmico (OH), sistema vertical (VF), sistema horizontal (HF) e sistema de molde (SF).

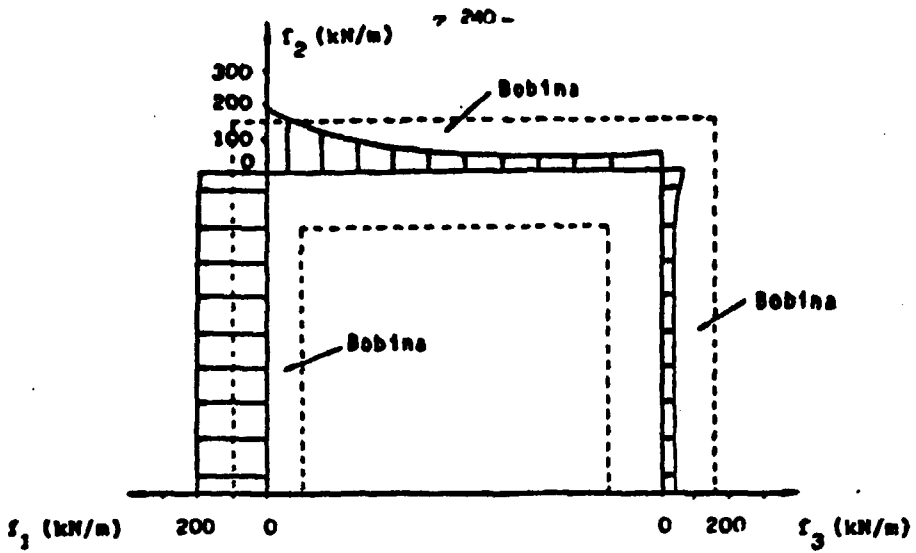


Fig. III - Distribuição de forças no plano interno da bobina.

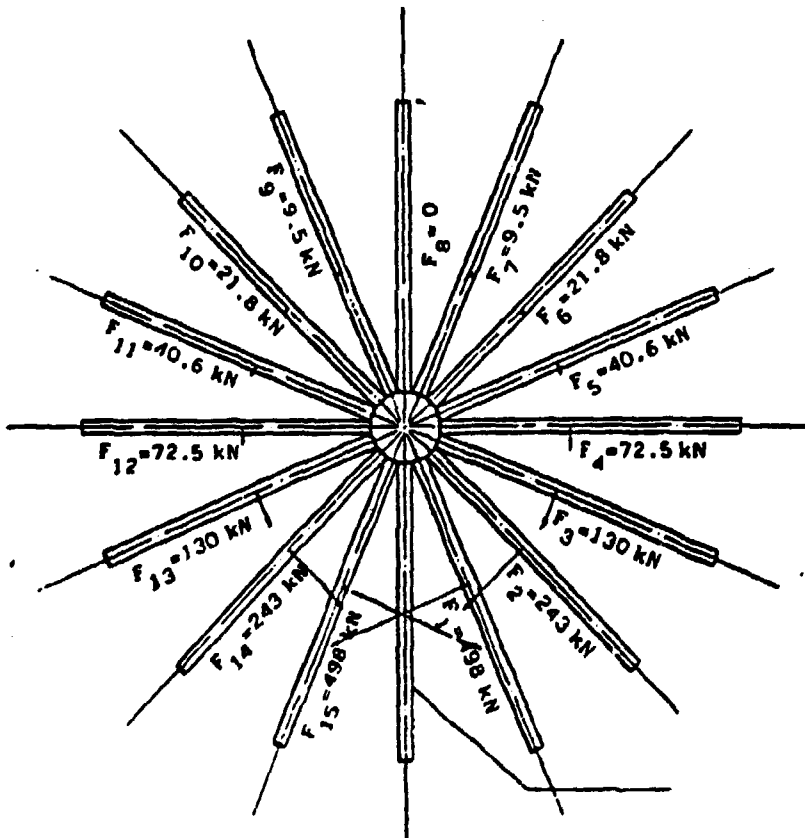


Fig. IV - Forças laterais de tombamento agindo

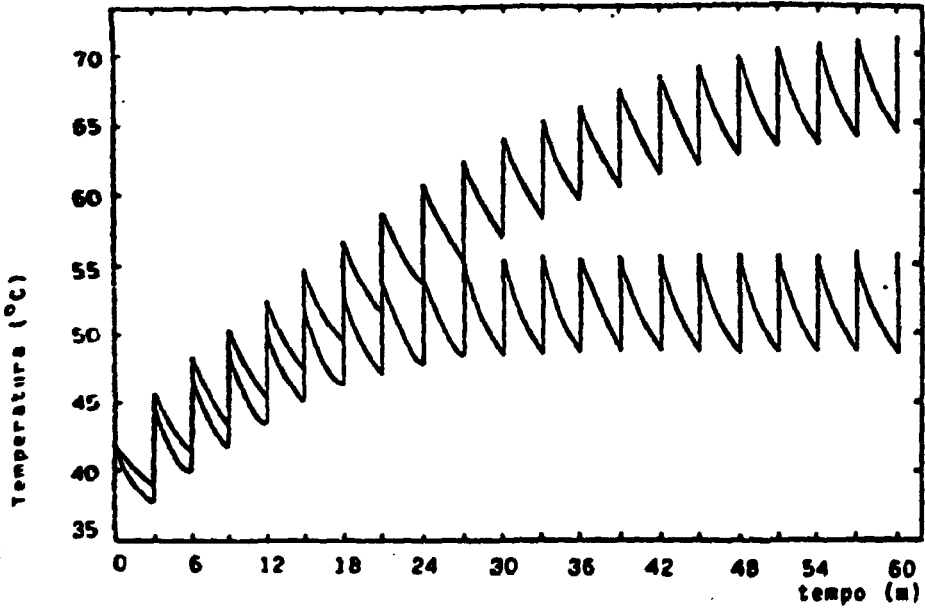


Fig. V - Temperatura do condutor de água ao longo do tempo do pulso.

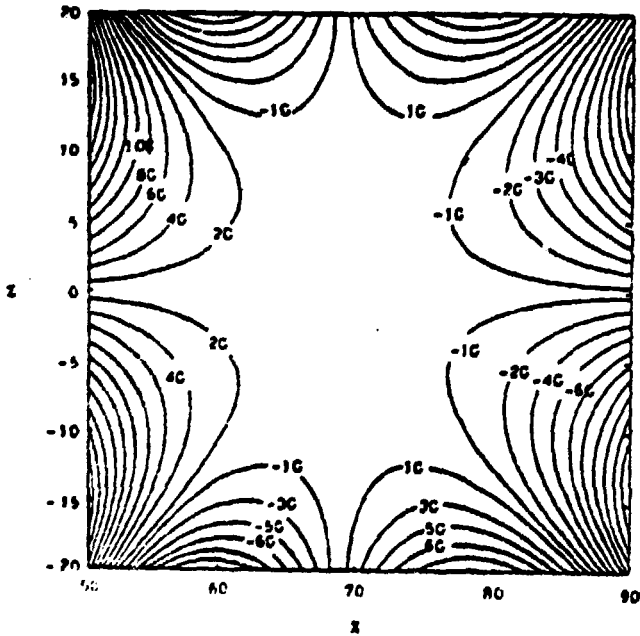


Fig. VI - Componente horizontal ao campo do OH.

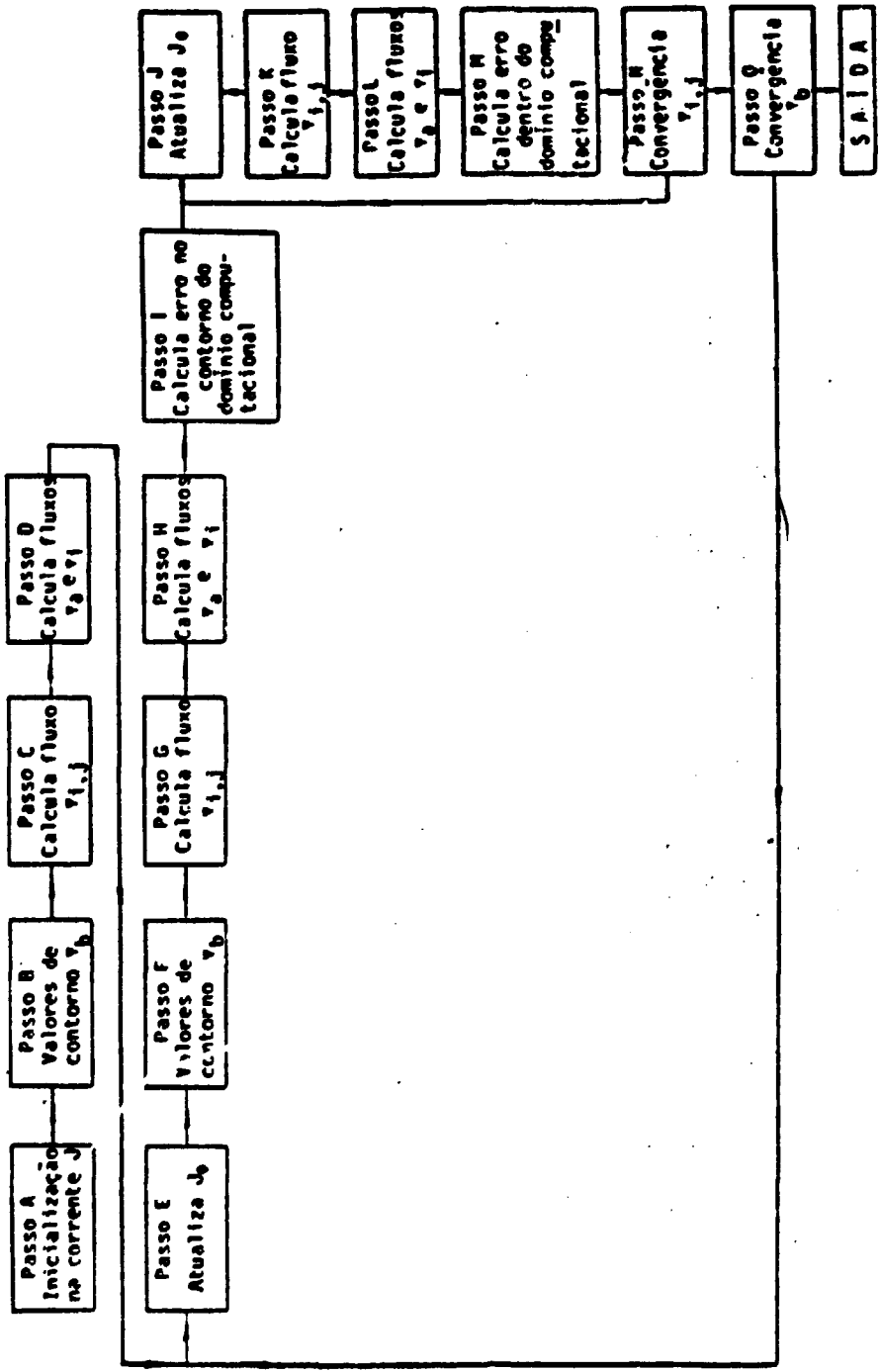


Fig. VII - Diagrama de fluxo do código EQ.

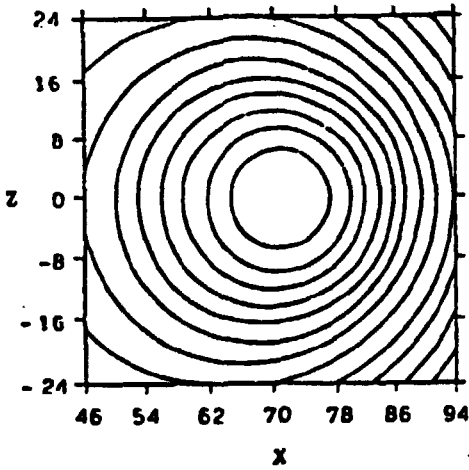


Fig. VIII - Configuração de plasma circular.

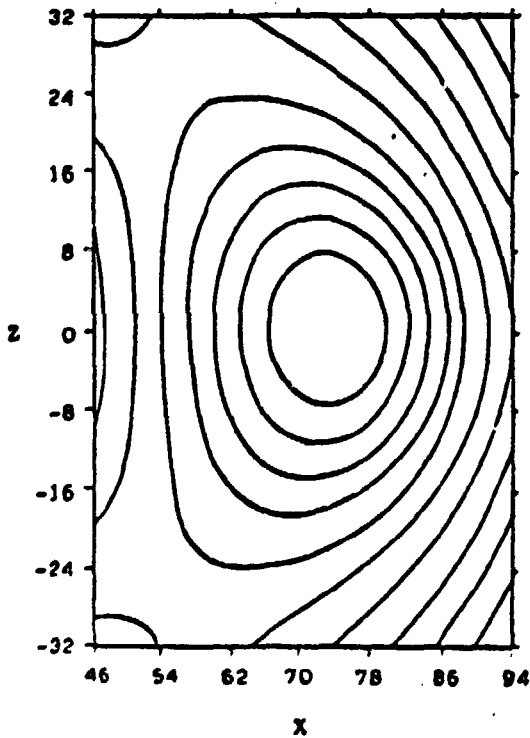


Fig. IX - Configuração de plasma alongado.