

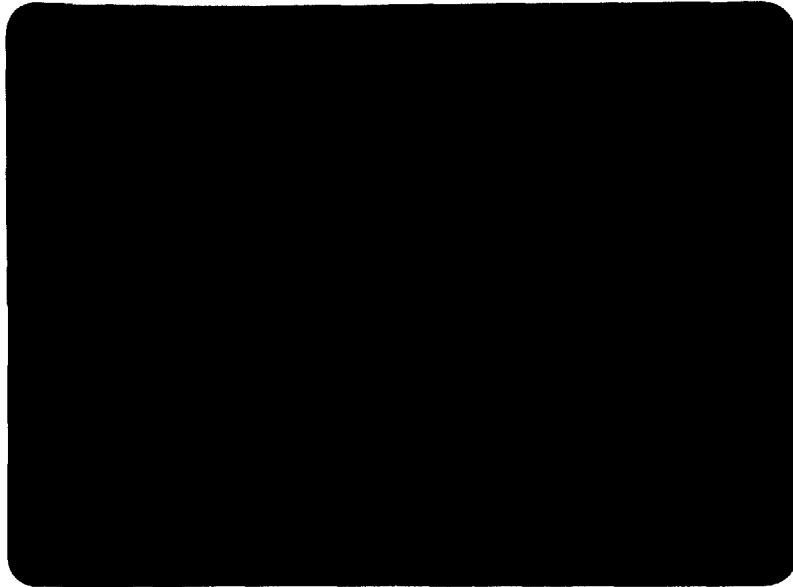


SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

---

---



**INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS**

---

---

1. Publicação nº INPE-2321-PRE/077	2. Versão	3. Data Fev., 1982	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem DTE	Programa Física dos Plasmas		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) ONDAS CENTRÍFUGA PLASMA			
7. C.D.U.: 533.9			
8. Título INPE-2321-PRE/077 TRABALHOS EXPERIMENTAIS EM PLASMA, DESENVOLVIDOS NO INPE. I- MÁQUINA DE PLASMA DUPLO PARA ESTUDO DE ONDAS LONGITUDINAIS II- CENTRÍFUGA DE PLASMA		10. Páginas: 15	
		11. Última página: 12	
		12. Revisada por <i>Abraham C.-L. Chian</i> Abraham C.-L. Chian	
9. Autoria J. L. Ferreira E. Del Bosco G. O. Ludwig  <i>José Bernardo Ferreira</i> Assinatura responsável		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Nelson de Jesus Parada Diretor	
14. Resumo/Notas Descrição <del>No presente trabalho são descritos</del> alguns dos experimentos desenvolvidos no Laboratório de Física dos Plasmas do INPE. Na primeira parte estão relatadas as características de uma máquina de plasma duplo, utilizada na geração e detecção de ondas ion acústicas, bem como alguns resultados obtidos até esta data. A segunda parte consiste na descrição do projeto de uma centrífuga de plasma. Nele estão contidas as características básicas para a construção de um dispositivo, que separa isótopos através de rotação eletromagnética do plasma. (autor)			
15. Observações Trabalho a ser apresentado no I Encontro Latino-Americano de Plasmas e Fusão Nuclear Controlada.			

ABSTRACT

~~This work describes~~ some experiments done at the Plasma Physics Laboratory at INPE. <sup>are described</sup> In the first part, the double plasma machine used for the study of ion acoustic wave propagation is described, and the results obtained so far are shown. The second part consists in the description of a plasma centrifuge project. It contains some basic parameters of our apparatus used for isotope separation, through electromagnetic rotation of the plasma. (author)

TRABALHOS EXPERIMENTAIS EM PLASMA, DESENVOLVIDOS NO INPE

I- MÁQUINA DE PLASMA DUPLO PARA ESTUDO DE ONDAS LONGITUDINAIS

José Leonardo Ferreira e Gerson Otto Ludwig

II- CENTRÍFUGA DE PLASMA

Edson Del Bosco e Gerson Otto Ludwig

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

12200 S.J. dos Campos, SP, Brasil

## PARTE I

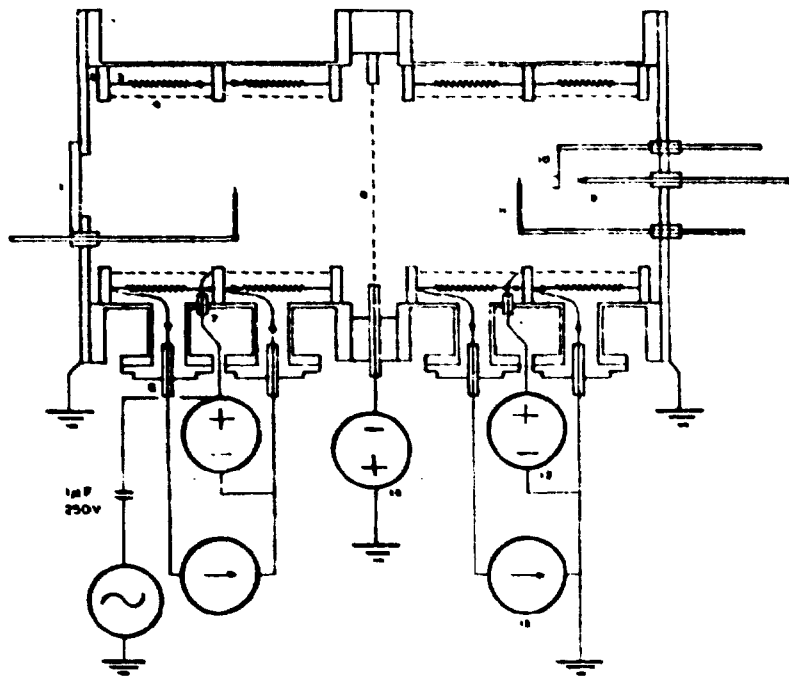
### MÁQUINA DE PLASMA DUPLO PARA ESTUDO DE ONDAS LONGITUDINAIS

#### INTRODUÇÃO

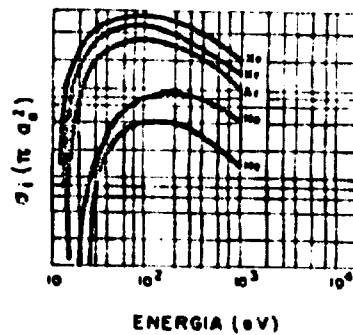
A máquina de plasma duplo<sup>1</sup> consiste em dois plasmas quiescentes, produzidos em uma câmara de vácuo comum, de formato cilíndrico, e separadas eletricamente por uma grade polarizada negativamente (Fig. 1a). O plasma produzido apresenta baixo nível de ruído em sua geração e uma grande região livre de gradientes de densidade e temperatura, características que o tornam ideal para a excitação e detecção de ondas ion acústicas.

#### PRODUÇÃO DO PLASMA

O plasma é formado através da colisão de elétrons com átomos neutros de um gás nobre, em geral Argônio, sob baixa pressão ( $\sim 10^{-4}$  torr) em uma descarga contínua. Os elétrons primários são emitidos termoionicamente por filamentos de tungstênio a uma temperatura de  $2600^{\circ}\text{K}$ . Estes elétrons são acelerados por anodos (Fig. 1a), cujo potencial determina a energia de colisão dos elétrons. A partir da seção de choque para ionização do Argônio, verifica-se que o valor mais adequado para o potencial do anodo está entre +30V e +100V (Fig. 1b).



MAQUINA DE PLASMA DUPLO  
fig. 1a



$\pi u_0^2$  - SEÇÃO DE CHOQUE P/ H - 0.8 a  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$

fig. 1b

PERFIL DE DENSIDADE

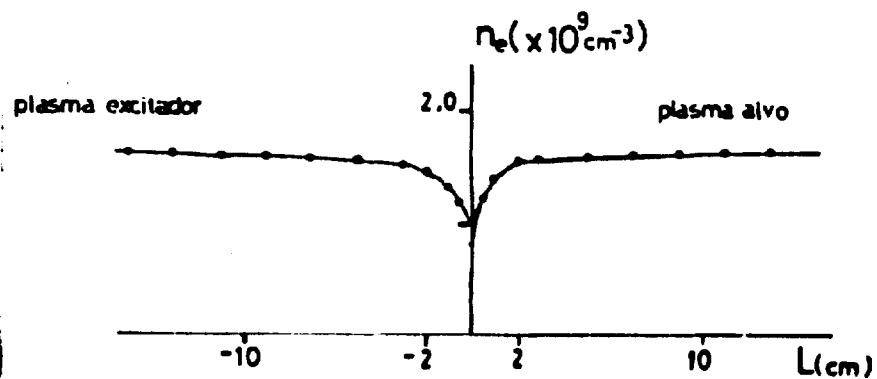


fig. 1c

Os parâmetros básicos do plasma, densidade e temperatura eletrônica ( $n_e$ ,  $T_e$ ), são obtidos a partir da curva característica de uma sonda de Langmuir em forma de "L". Com ela é possível avaliar o perfil espacial  $n_e$  e  $T_e$ . O perfil longitudinal de  $n_e$  é apresentado na Fig. 1c.

#### DISPERSÃO E AMORTECIMENTO DE ONDAS ION ACÚSTICAS

A excitação de ondas ion acústicas lineares (potencial de excitação  $\phi \ll \frac{k_B T_e}{e}$ ) é feita através da aplicação de um campo elétrico entre os plasmas. Este campo é produzido, aplicando-se uma perturbação no potencial do anodo do plasma excitador.

As ondas ion acústicas são produzidas no plano de separação dos plasmas, e têm sua velocidade de propagação determinada pela inércia dos ions ( $m_i \gg m_e$ ) e pela pressão exercida pelos elétrons. A detecção das ondas é feita no plasma alvo, por meio de uma sonda de Langmuir, polarizada na região de saturação da corrente de elétrons. O sinal produzido na sonda pelas flutuações na densidade eletrônica é registrado em um osciloscópio, ou através de um registrador XY, após ser processado por um integrador síncrono?

As Figs. 2a e 2b mostram o perfil temporal da perturbação para várias distâncias entre a sonda e a grade separadora, para duas formas de excitação. Na Fig. 2a a excitação é realizada com uma onda senoidal contínua e na Fig. 2b, com um pacote de ondas senoidais. As velocidades de fase e de grupo são determinadas, utilizando-se a técnica de tempo de voo.

A partir das equações de Boltzmann com termos de colisões BGK, para um plasma constituído por duas espécies de partículas e com baixa percentagem de ionização (- 0,8%), obtêm-se a relação de dispersão e uma expressão para o amortecimento de ondas iões acústicas lineares, incluindo-se o efeito de colisões entre iões e átomos neutros, com frequência  $\nu_{in}^{3,4}$ :

$$\frac{\omega}{\omega_i} = \frac{k\lambda_D}{(1+k^2\lambda_D^2)^{1/2}} \left[ 1 + \frac{3}{2} \frac{T_i}{T_e} (1+k^2\lambda_D^2) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\gamma}{\omega_i} = \frac{\nu_{in}}{2\omega_i} \left[ 1 + 3 \frac{T_i}{T_e} (1+k^2\lambda_D^2) \right] - \left(\frac{\pi}{8}\right)^{1/2} \frac{k^2\lambda_D}{(1+k^2\lambda_D^2)^2} \left[ \left(\frac{m_e}{m_i}\right)^{1/2} + \left(\frac{T_e}{T_i}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{T_e/2T_i}{1+k^2\lambda_D^2} - \frac{3}{2}\right) \right], \quad (2)$$

onde  $\omega_i$  é a frequência iônica de plasma,  $\lambda_D$  o comprimento de blindagem,  $T_i$  a temperatura dos iões e  $\gamma$  a constante de amortecimento. Na última expressão, o segundo termo refere-se ao amortecimento não-colisional de Landau.

## RESULTADOS

Através da medida das velocidades de fase e de grupo, e da variação da amplitude da onda com a distância de propagação, foram obtidos valores para  $k$  e  $\gamma$  no intervalo de frequências ente 10 KHz e 150 KHz. Comparando-se os valores experimentais com os obtidos das expressões (1) e (2), é possível estimar o valor de  $T_e$  e da razão  $T_e/T_i$  (Figs. 2c e 2d).



DE SiO<sub>2</sub> film

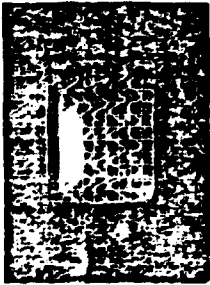


Fig. 20  
20  
20  
20

$v = 1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$

Fig. 20

evaporation

evaporation

$b/T = 5$

10

∞

$T = 15 \text{ eV}$   
 $P_{\text{ev}} = 10^{-3} \text{ Torr}$

$\chi(\text{s}^{-1})$

10<sup>5</sup>

0

10<sup>5</sup>

0

500

$s(\text{m}^2)$

Fig. 20

DE SiO<sub>2</sub> film

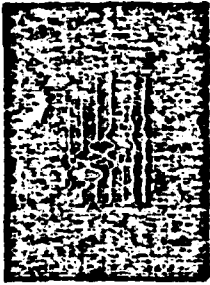


Fig. 21  
21  
21  
21

$v = 1.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$

Fig. 21

evaporation

evaporation

$b/T = 5$

10

∞

$T = 15 \text{ eV}$   
 $P_{\text{ev}} = 10^{-3} \text{ Torr}$

$\chi(\text{s}^{-1})$

10<sup>5</sup>

0

10<sup>5</sup>

0

500

$s(\text{m}^2)$

Fig. 21

As temperaturas  $T_e$ , obtidas a partir das curvas características da sonda e das relações de dispersão, são compatíveis, para o caso de excitação contínua. Com  $T_e/T_i \approx 8$  (Fig. 2c), a temperatura dos íons é da ordem de 0,18 eV. Para o caso de excitação com pacotes de onda, as medidas de temperatura efetuadas simultaneamente com a sonda foram prejudicadas, devido a flutuações na corrente que passa pelos filamentos. Uma variação de 1A pode causar a mudança de até 0,3 eV em  $T_e$ . Para este caso  $T_e/T_i \approx 5$  e, portanto,  $T_i \approx 0,16$  eV (Fig. 2d).

A maior fonte de erro na avaliação do amortecimento está na excitação de ondas senoidais contínuas, pois existe um sinal diretamente acoplado com o sinal de excitação, que não pode ser separado do sinal detetado pela sonda.

#### REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> Taylor, R.I., Mackenzie, K.R.; Ikezi H., The Review of Scientific Instruments, Vol. 43, Nº 11, Nov. 1972
- <sup>2</sup> Wong A.Y. - "Introduction to Experimental Plasma Physics" - University of California, 1977.
- <sup>3</sup> Fried B.R.; Conte S.D. - "The Plasma Dispersion Function" - Academic Press, New York, 1961.
- <sup>4</sup> Wong A.Y., Motley K.W. and D'Angelo N., Phys. Rev. Vol. 133, nº 2A, Jan. 1961.

## PARTE II

### CENTRÍFUGA DE PLASMA

#### INTRODUÇÃO

A Física dos Plasmas é um campo de pesquisa onde se encontra uma grande quantidade de trabalhos de interesse prático. Destaca-se aqui o emprego do plasma na separação de elementos ou isótopos. Os esquemas que se mostram mais promissores nessa linha são: rotação e ressonância ciclotrônica de íons (RCI)<sup>1,2</sup>:

A obtenção de elementos físséis enriquecidos, como  $U^{235}$ , é um dos principais objetivos das pesquisas com plasma em rotação ou com RCI. No entanto, deve-se enfatizar a importância do estudo da rotação na Astrofísica<sup>3</sup>, na separação de impurezas para as máquinas de Fusão Nuclear, na separação de deutério e trítio, entre outras. Da mesma forma, deve-se realçar a importância da RCI no aquecimento de plasmas.

Os resultados experimentais obtidos até agora confirmam o efeito de separação previsto teoricamente. Mas de nenhum dos esquemas existentes, pode-se concluir que a utilização desse processo em grande escala seja economicamente viável. A principal meta dos trabalhos em andamento é o desenvolvimento da Física e não a obtenção de pro

cessos práticos.

Provavelmente, a primeira publicação sobre a utilização de plasma em rotação para separação de isótopos deve-se a Bonnevier<sup>4</sup> (1966). Posteriormente, o próprio Bonnevier<sup>5</sup> (1971) observou a separação dos elementos  $H_2/Ar$ ,  $H_2/D_2$  e isótopos de Neônio 20/22 (5%). James and Simpson<sup>6</sup> (1976) obtiveram 20% de enriquecimento de  $Ne^{20}$ . Recentemente, Krishnan et al.<sup>7</sup> (1981) mediram 100% de enriquecimento de  $Cu^{65}$ .

O escasso número de resultados experimentais publicados sobre separação de isótopos metálicos com centrífuga de plasma, o interesse em plasma de múltiplas espécies e o estudo de arcos em plasma motivaram a construção de uma centrífuga no INPE. Dentre os objetivos, destaca-se: a determinação da influência dos parâmetros externos (amplitudes e durações do campo magnético e da descarga elétrica) para confrontação com trabalhos teóricos.

#### PROCESSO DE SEPARAÇÃO

O princípio de funcionamento da centrífuga de plasma é o mesmo das centrífugas mecânicas, ou seja, é baseado nos diferentes valores da força centrífuga experimentada por partículas de massas diferentes, quando em rotação. As partículas mais pesadas são mais fortemente afetadas pela força centrífuga. Decorrido algum tempo, a sua concentração é maior longe do eixo de rotação, enquanto as partículas mais leves, menos afetadas, apresentam maior concentração perto do eixo de rotação.

As centrífugas mecânicas alcançam velocidades de até 300m/s, sendo essa velocidade limitada pelas propriedades mecânicas do material da câmara. Nas centrífugas de plasma, a câmara é fixa e o gás ionizado é posto em rotação pela interação de cargas elétricas, que se movimentam perpendicularmente a um campo magnético externo ( $J \times B$ ), atingindo velocidades da ordem de  $10^4$ m/s. A geometria cilíndrica é preferencialmente utilizada, sendo o campo magnético axial ( $B_z$ ) e a corrente elétrica radial ( $J_r$ ) que originam uma força na direção azimutal ( $J_r B_z$ ). Embora as velocidades obtidas sejam altas, essa vantagem é parcialmente diminuída pela grande difusão de partículas, devido à alta temperatura do plasma.

#### DESCRIÇÃO

As principais características da centrífuga de plasma, em construção no INPE, são listadas a seguir:

- 1- Uma câmara cilíndrica de aço inoxidável ( $l=80$  cm,  $d=22$  cm), a qual é evacuada por uma bomba difusora (700 l/s);
- 2- Um conjunto de bobinas magnéticas, formado por 8 espiras ( $d_i=25$  cm,  $d_e=44$  cm,  $e=3,2$  cm), construídas com fios de cobre de secção transversal retangular (0,46 x 1,5 cm), separadas por placas de alumínio para refrigeração, apresentando no total a espessura de 34 cm. O dimensionamento das espiras foi feito, visando a obtenção do maior valor possível para o campo magnético!

Os parâmetros elétricos do conjunto são:  $R = 98,2$  m $\Omega$  e

$L = 18,3$  mH.

- 3- Um banco de capacitores eletrolíticos, com capacitância de 31mF e voltagem até 1,4kV (31kJ), que é descarregado no conjunto de bobinas para criação do campo magnético axial. Acionada por um tiristor, a corrente aumenta senoidalmente até atingir o seu valor máximo de 1,6 kA no intervalo de 36 ms, quando um diodo passa a conduzir e a corrente decresce exponencialmente, com constante de tempo de 186 ms. O valor máximo do campo magnético é de 14 kG.
- 4- Um banco de capacitores a óleo, com capacitância de 15  $\mu$ F e voltagem até 20kV (3kJ), que é descarregado entre o catodo (eletrodo central) e o anodo (parede da câmara) para manter a corrente radial  $J_r$ . Um pulso de Laser de Rubi de potência 200MW e duração de 40 ns é focalizado sobre o catodo, que é constituído do material que se deseja processar a separação isotópica<sup>7,9</sup>, precipitando a descarga do banco de capacitores.

#### DIAGNÓSTICO

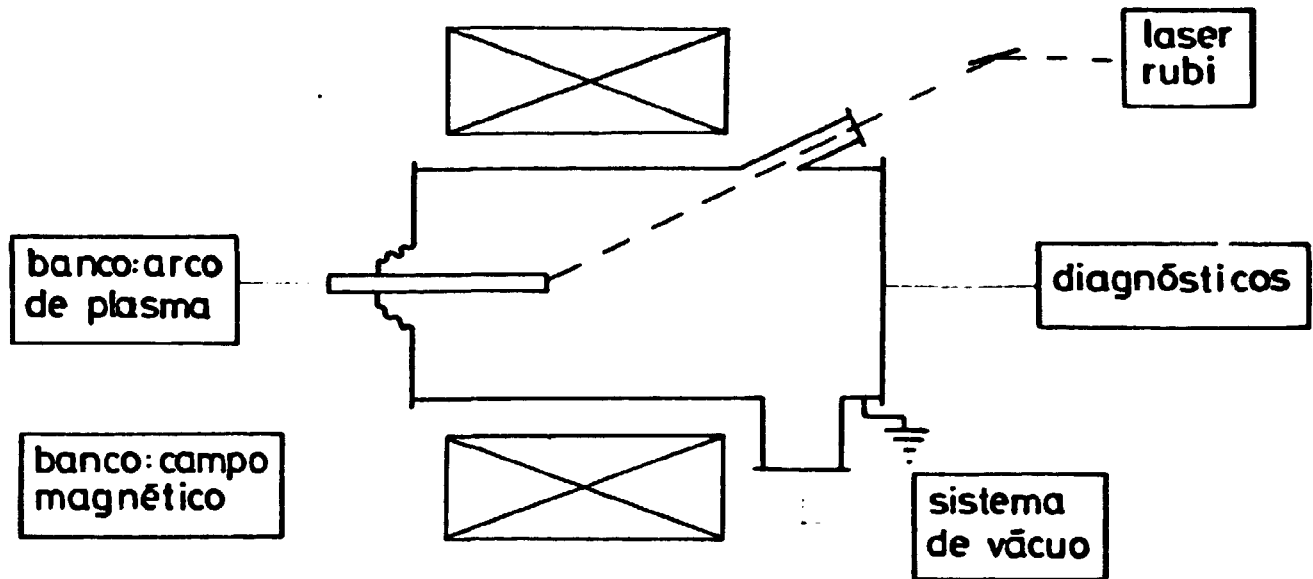
Na primeira fase de operação da centrífuga, deseja-se somente observar a ocorrência da separação dos elementos de uma liga metálica (cobre e níquel), sem a preocupação de estudar a influência dos parâmetros externos. Para tanto, serão colocadas pequenas lâminas de tungstênio refrigerado em posições radiais diversas. Após vários disparos da máquina, a deposição do material nas lâminas será diagnosticada com espectrômetro de massa.

Posteriormente, para o estudo da influência dos parâmetros externos, torna-se necessário obter os perfis temporais da fração de separação. A maior dificuldade que surge é a utilização do espectrômetro de massa em regiões de campo magnético intenso. Por outro lado, o trabalho com elementos metálicos impossibilita a colocação do espectrômetro em posições afastadas da câmara. Para tanto, estuda-se a utilização de um sistema de lentes eletrostáticas, em conjunto com um espectrômetro rápido e de alta resolução<sup>10</sup>.

#### REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> F. Boeschoten e N. Nathrath ("Plasma Separating Effects")
- <sup>2</sup> J.M. Dawson et al., Phys. Rev. Letters 37, 23 (1976)
- <sup>3</sup> L.R. Srnka - Plas.Phys. 16, 1129 (1974)
- <sup>4</sup> B. Bonnevier, Ark. Fys. 33, 255 (1966)
- <sup>5</sup> B. Bonnevier, Plas. Phys. 13, 763 (1971)
- <sup>6</sup> B.W.James and S.W. Simpson, Plas. Phys. 18, 259 (1976)
- <sup>7</sup> M. Kirshnan et al., Phys. Rev. Lett. 46, 1, 36 (1981)
- <sup>8</sup> D.B. Montgomery - "Solenoid Magnet Design", John Wiley & Sons, Inc. (1969)
- <sup>9</sup> T.P. Hughes - "Plasma and Laser Light" Adam Hilger (1975)
- <sup>10</sup> M. Krishnan and J.L. Hirshfield, Rev.Sci.Inst. 51, 7 (1960).

### DIAGRAMA DA CENTRIFUGA-PCEN



- 1-correntes nos bancos (bobinas de Rogowsky)
- 2-tensões nos bancos (pontas de alta tensão)
- 3-campo magnético (sonda magnética)
- 4-sonda eletrostática
- 5-espectrômetro de massa