



MINISTERIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS**

8. Título

INPE-4242-RPE/548

PROPOSTA PARA CONSTRUÇÃO DO INJETOR DE  
PARTÍCULAS ENERGÉTICAS (IPE)

9. Autoria

M. Ueda  
A.C.A. Ferreira  
Y. Aso

Assinatura responsável

*Mario Ueda*

1. Publicação nº <i>INPE-4242-RPE/548</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1987</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>LAP</i>	Programa <i>PTOR</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>INJETOR DE FEIXE INTENSO DE IONS GERADOR DE PULSO DE ALTA POTÊNCIA INJEÇÃO DE IONS EM TOKAMAKS</i>			
7. C.D.U.: <i>533.9</i>			
8. Título <i>INPE-4242-RPE/548</i>  <i>PROPOSTA PARA CONSTRUÇÃO DO INJETOR DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS (IPE)</i>		10. Páginas: <i>34</i>	11. Última página: <i>26</i>
9. Autoria <i>M. Ueda A.C.A. Ferreira Y. Aso</i>		12. Revisada por  <i>Ricardo M.O. Galvão</i>	
Assinatura responsável: <i>Mário Ueda</i>		13. Autorizada por  <i>Mário Antonio Ralupp Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas  <i>Propõe-se a construção de um acelerador eletrostático para a produção de feixe intenso de íons. O pulso de alta voltagem a ser usado na aceleração dos íons (500kV, 1µs) será fornecido por um gerador Marx. Usando este pulso, um feixe de prótons de alta corrente (&gt;200kA) será extraído de um diodo magneticamente isolado, cujo anodo é um plasma produzido por uma descarga indutiva de gás hidrogênio. Este feixe será injetado no dispositivo Tokamak de confinamento magnético de plasma ETA (Experimento Toroidal Avançado), para estudos de aquecimento, realimentação do plasma toroidal e geração de corrente não-indutiva.</i>			
15. Observações			

#### ABSTRACT

*The construction of an electrostatic accelerator to produce an intense ion beam is proposed. The high voltage pulse to be used in the acceleration of the ions (500kV, 1 $\mu$ s) will be provided by a Marx generator. Using this pulse, a high total current proton beam (>200kA) will be extracted from a magnetically insulated diode with an anode plasma produced by an inductive breakdown of hydrogen gas. The beam will be injected into a magnetic confinement device, a Tokamak to be called ETA (Experimento Toroidal Avanzado), to study heating, refueling and noninductive current generation in toroidal plasmas.*

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vii
1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
2 - <u>OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS</u> .....	4
3 - <u>VIABILIDADE DA INJEÇÃO E CAPTURA DE IONS NO TORÓIDE</u> .....	5
4 - <u>PROJETO PRELIMINAR DO INJETOR DE IONS IPE</u> .....	9
4.1 - Gerador de pulso de alta potência .....	11
4.2 - Diodo magneticamente isolado com um plasma de anodo ativo com geometria esférico-anular para focalização do feixe .....	15
5 - <u>CRONOGRAMA DA EXECUÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO PROJETO IPE E EXPERIMENTO NO ETA</u> .....	19
6 - <u>RELAÇÃO DE PESSOAL PARA INTEGRAR O GRUPO DE FEIXE E ORÇAMENTO DO PROJETO</u> .....	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Esquema do experimento de injeção de feixe intenso de íons no Tokamak ETA .....	8
2 - Diagrama de blocos do injetor de íons .....	10
3 - Circuito simplificado de um gerador Marx de 10 estágios .....	12
4 - Esquema do gerador Marx a ser usado no injetor IPE .....	14
5 - Desenho esquemático do diodo CIPAA .....	16
6 - Cronograma da execução do experimento de injeção do feixe <u>in</u> tenso no Tokamak ETA .....	19

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Parâmetros do feixe produzido pelo injetor IPE .....	6
2 - Características principais do Tokamak ETA .....	7
3 - Características do gerador de pulso de alta voltagem .....	13
4 - Características do diodo CIPAA para extração do feixe de íons	17

## 1 - INTRODUÇÃO

A produção de plasmas com parâmetros suficientes para iniciar a ignição de um reator de fusão (temperaturas de 10keV, densidade  $\times$  tempo de confinamento de  $10^{14} \text{cm}^{-3}\text{s}$ ) vem sendo tentada há mais de três décadas nos países de alto desenvolvimento tecnológico. Presentemente existem basicamente dois métodos distintos de geração de plasmas considerados capazes de propiciar a condição de ignição: confinamento magnético e confinamento inercial. No primeiro método, um plasma de densidade de  $10^{14} \text{cm}^{-3}$  deve ser confinado magneticamente por tempos da ordem de  $1\text{s}$ . Por outro lado, no confinamento inercial, o plasma, que é produzido incidindo um feixe de laser ou partículas numa esfera sólida, é comprimido até atingir densidades de  $10^{25} \text{cm}^{-3}$  (1000 vezes a densidade no seu estado sólido) em tempos da ordem de  $10^{-9}\text{s}$ . Entre os dispositivos de confinamento magnético de plasmas existentes atualmente destaca-se o Tokamak, no qual têm sido atingidos parâmetros de plasmas bastante próximos aos necessários à condição de fusão (JET team, 1986). O sucesso do tokamak se deve em grande parte ao aumento expressivo da temperatura de plasma obtido com a injeção de partículas neutras no plasma confinado. Neste processo de aquecimento de plasma, o íon  $\text{H}^+$  é extraído de uma fonte de plasma de baixa densidade, acelerado por um potencial da ordem de 50-100keV, neutralizado numa região com alta densidade de gás e injetado no toróide através do campo de confinamento. O feixe composto de partículas neutras de alta energia penetra no toróide sem sofrer a ação do campo magnético que confina os íons do plasma. Uma vez dentro do plasma, as partículas neutras de alta energia se ionizam por colisões com o plasma quente e são confinadas, podendo transferir energia ao plasma ou gerar corrente no Tokamak, dependendo dos parâmetros do feixe e do plasma.

Recentemente, dois problemas associados à injeção de partículas neutras estão recebendo muita atenção. Um deles é a baixa eficiência (<20%) de transferência de carga na região de neutralização dos íons com energias de interesse (>100keV). Para aquecer a parte central do plasma produzido num reator de fusão, serão necessários íons de cerca de 400keV, o que inviabiliza a aplicação direta deste método no aquecimento

do plasma num reator de fusão. Para melhorar a eficiência de produção de  $H^0$  energéticos, estão em desenvolvimento fontes de íons negativos que apresentam alta eficiência de transferência de carga no processo de neutralização (Hershcovitch et al., 1986). Entretanto, a tecnologia dos injetores de íons negativos está ainda na sua infância quando comparada à dos injetores de partículas neutras convencionais. O outro problema da injeção do feixe neutro é a redução do tempo de confinamento do plasma (que pode chegar até 50% do tempo de confinamento normal) causada pela sua aplicação. Uma recuperação parcial do tempo de confinamento em Tokamaks com injeção de partículas neutras tem sido observada nos experimentos nos quais se usam diversores (Furth, 1986). Entretanto, diversores introduzem complicações adicionais no projeto do dispositivo.

Um método alternativo de aquecimento de plasma e geração de corrente que foi sugerido recentemente consiste em injetar um feixe intenso de íons no plasma produzido num Tokamak (Ott and Manheimer, 1977; Manheimer and Winsor, 1981). Os aspectos básicos deste processo, tais como a injeção do feixe perpendicularmente ao campo magnético e captura do feixe na região de confinamento, têm sido extensivamente estudados nos laboratórios (Peter and Rostoker, 1982; Robertson et al., 1981; Kamada et al., 1979; Katzenstein et al., 1983; Ishizuka et al., 1982). Foi demonstrado experimentalmente que a penetração do feixe perpendicularmente ao campo se processa graças à polarização do feixe que resulta em sua deriva  $ExB$  (Robertson et al., 1981; Kamada et al., 1979). O aprisionamento do feixe injetado resulta da sua despolarização devido à drenagem de cargas superficiais quando o feixe entra em contato com o plasma confinado (Katzenstein et al., 1983), ou via linhas de campos conectados a uma placa condutora (Ikehata et al., 1986). O maior mérito da injeção de feixe de íons intensos num plasma confinado é a possibilidade do seu aproveitamento direto para aquecimento ou geração de corrente, uma vez que não existe a necessidade de neutralizar os íons acelerados por meio de células de gás, como nos injetores de partículas neutras.

Muito recentemente Rostoker and Rahman (1986) sugeriram a injeção de feixe de íons de 500keV, com uma temperatura de 50keV, num Tokamak com uma alta razão de aspecto ( $R/a \sim 17$ ) e campo vertical elevado

(-6kG). A idéia central daquela proposta é explorar a possibilidade de construir um reator de fusão que não chega a atingir a ignição, mas com multiplicação de energia da ordem de 10 a 20 vezes. Os processos de fusão neste método resultam de encontros entre os íons energéticos aprisionados no campo do Tokamak. Como a razão de aspecto no Tokamak ETA será pequena ( $R/a \sim 2,0$ ) e o campo vertical será baixo (600G), não poderemos testar diretamente a idéia descrita acima no nosso dispositivo, embora os processos de injeção, captura e aprisionamento do feixe sejam semelhantes nos dois casos. Entretanto, poderemos explorar futuramente o regime proposto por Rostoker, construindo um sistema de bobinas capaz de gerar um campo vertical de 6kG e reduzindo o raio menor do plasma para 3cm no ETA.

A geração de feixe intenso de íons envolve o uso de tecnologia de pulsos de alta voltagem que se baseia quase que exclusivamente em geradores de pulso do tipo Marx. Como atualmente não existem tais tipos de geradores no Brasil, seria necessário adquirir capacitação técnica para produzir este tipo de equipamento. O ganho tecnológico resultante será elevado, uma vez que pulsos de alta voltagem encontram aplicações não somente em produção de feixe de íons, mas também na geração de feixe intenso de elétrons (Nation, 1979), micro Z-pinches (Baldock et al., 1986), implosão "liner" (Aranchuck et al., 1982) e testes de alta voltagem. Em particular, o feixe intenso de íons poderá ser usado no aquecimento e geração de corrente em Tokamak, como já mencionado, na estabilização e aquecimento de toróides compactos (Litwin et al., 1984), na produção de configurações de reversão de campos por anéis de íons (Dreike et al., 1979), na produção de nêutrons (Ramires et al., 1977), no bombeamento de lasers (Wiley and Hammer, 1983), nos testes de materiais para a parede do reator de fusão (Mohri et al., 1980) e como impulsores em reator de fusão por confinamento inercial (Humphries, 1980). Além destas aplicações, o feixe de íons ainda pode ser utilizado na indústria para fazer "annealing" de semicondutores (Hodgson et al., 1980), implantação de íons com "auto-annealing" (Baglin et al., 1981), processamento de superfícies metálicas e isolantes (Adler, 1985), e produção de células solares (Ziegler, 1987).

Existem possibilidades de aproveitamento do feixe intenso de elétrons em aquecimento de plasmas (Greenspan et al., 1980), aceleração de íons (Yonas, 1973), geração de radiações intensas (Sprangle and Coffey, 1984), geração de microondas de alta potência (Granastein et al., 1973), produção de raio X para radiografias (Yonas and Toepfer, 1978), estudos de propriedades mecânicas e termodinâmicas de materiais sólidos (Oswald et al., 1971), bombeamento de lasers (Basov et al., 1971), lasers de elétrons livres (Fajans et al., 1984) e irradiação de alimentos e materiais médicos (Buttram and Prestwich, 1985).

Na Seção 2 apresentamos os objetivos e justificativas do experimento; na Seção 3 discutimos a viabilidade da injeção e captura dos íons energéticos no toróide; na Seção 4 apresentamos o projeto do injetor, incluindo o gerador Marx e o diodo baseado na descarga induzida de gás; na Seção 5 mostramos o cronograma tentativo do projeto; finalmente, avaliamos a relação de pessoal e o orçamento necessários ao projeto na Seção 6.

## 2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O objetivo do nosso experimento é construir um injetor de partículas de alta energia para aquecer, realimentar o plasma e gerar corrente não-indutiva no dispositivo de confinamento magnético toroidal ETA. Portanto, primeiramente teremos de *dominar* a tecnologia de pulsos de alta voltagem construindo um gerador Marx. A seguir deveremos *desenvolver* um diodo capaz de fornecer altas correntes (>100kA) e pulsos longos (>1 $\mu$ s) de feixe puro de prótons. Subseqüentemente o injetor deverá ser acoplado ao Tokamak ETA; e será então estudado um método eficiente de injeção, captura e aprisionamento do feixe protônico naquele dispositivo. Conseqüentemente, além do objetivo principal de melhorar os parâmetros do plasma obtidos no Tokamak, a construção do injetor possibilitará uma pesquisa de vanguarda da física de díodos usados na extração de feixes intensos e um desenvolvimento nacional da tecnologia de pulsos de alta voltagem. O domínio da tecnologia de pulsos é importante tanto para as áreas de fusão controlada (confinamento magnético e inercial), quanto

para outras áreas de pesquisas que envolvem altas voltagens e têm potenciais aplicações nas indústrias, tais como processamento de materiais, desenvolvimento de lasers de alta potência (inclusive lasers de elétrons livres) e irradiação de alimentos, para citar alguns exemplos.

### 3 - VIABILIDADE DA INJEÇÃO E CAPTURA DE ÍONS NO TORÓIDE

Para fazer propagar um feixe intenso de íons de uma distância significativa do ponto de vista prático (>10cm), é necessário que a extração do feixe do "gap" acelerador seja seguida imediatamente por uma neutralização de carga através da injeção de elétrons via paredes da região de propagação ou pela passagem do feixe extraído num gás ou plasma. A neutralização de carga é necessária para evitar a destruição imediata do feixe por efeitos dos campos elétricos e magnéticos autogerados. Conseqüentemente, um feixe intenso de íons em propagação deve ser constituído de íons de alta energia e de um igual número de elétrons de baixa energia, os quais são arrastados pelos íons.

Cálculos teóricos indicam que haverá penetração eficiente deste feixe neutralizado em carga e corrente numa região de campo magnético se for obedecida a condição:

$$\epsilon = 1 + (w_{pi}/\Omega_i)^2 \gg 1 \quad \text{ou} \quad (w_{pi}/\Omega_i)^2 \gg 1, \quad (1)$$

sendo  $\epsilon$  a constante dielétrica,  $w_{pi}$  a frequência de plasma do feixe, e  $\Omega_i$  a frequência ciclotrônica do feixe no campo toroidal. Esta condição foi deduzida por Schmidt (1960) para o caso de penetração de plasma numa região de campo magnético e posteriormente mostrada ser válida por Ott e Manheimer (1977) também para o caso de um feixe intenso de íons injetado perpendicularmente ao campo. Fixado o campo magnético, ele determina ordens mínimas de densidade de íons no feixe para que haja penetração. Fisicamente, a penetração torna-se possível porque ocorrem a separação de carga e o aparecimento de camadas eletrizadas na superfície do feixe, o que dá origem a um campo de polarização intenso  $E$ , de modo que a velocidade  $v$  do feixe é a mesma antes e depois de penetrar a região do campo

magnético. No processo, a relação de deriva:

$$\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B} = 0 \quad (2)$$

ajusta o campo elétrico gerado. Já foi demonstrada experimentalmente a penetração de feixes para os quais a constante dielétrica atinge valores superiores a 100 (Kamada et al., 1979; Ishizuka and Robertson, 1982), bem como a validade da relação de deriva (Ishizuka and Robertson, 1982).

Propomos aqui a construção de um injetor de íons que opera com voltagem da ordem de 500kV, comprimento de pulso maior que 1µs e corrente total de íons de cerca de 200kA. Para atingir tal corrente, usaremos um diodo com área de extração de cerca de 400cm<sup>2</sup>, com capacidade de gerar 500A/cm<sup>2</sup> de densidade de corrente. Os parâmetros fundamentais do feixe de íons a ser injetado no ETA são fornecidos na Tabela 1.

#### TABELA 1

##### PARÂMETROS DO FEIXE PRODUZIDO PELO INJETOR IPE

TIPO DE ÍONS .....	variável, mas serão prótons para injeção no ETA.
ENERGIA DOS ÍONS .....	~500kV.
DURAÇÃO DE PULSO DO FEIXE .....	>1µs.
ENERGIA TOTAL NO PULSO .....	~20kJ.
POTÊNCIA DO FEIXE .....	20 x 10 <sup>9</sup> W.
DENSIDADE DE CORRENTE NO DIODO .....	~500A/cm <sup>2</sup> .
CORRENTE TOTAL .....	~200kA.
DENSIDADE DE CORRENTE NO FOCO .....	~16kA/cm <sup>2</sup> .

Para garantir que o feixe penetre no campo de confinamento do plasma, efetuaremos ainda uma focalização do feixe usando um diodo com geometria esférico-anular. Espera-se assim poder concentrar o feixe numa área de secção de  $12\text{cm}^2$ , atingindo uma densidade de corrente de cerca de  $16\text{kA/cm}^2$  no foco. A densidade do feixe atingiria então  $n_f \sim 10^{14}\text{cm}^{-3}$  naquele ponto e, conseqüentemente, obteríamos um fator  $(\omega_{pi}/\Omega_i)^2 = 1,3 \times 10^3$ , que seria suficiente para permitir a penetração do feixe no toróide. (Aqui supomos que  $B = 12\text{kG}$  no ETA.) A focalização do feixe também permite reduzir a porta de acesso dos íons ao toróide e, assim, diminuir o "ripple" do campo toroidal, além de facilitar o bombeamento diferencial entre o toróide e o injetor de íons. O bombeamento é necessário para impedir que o gás usado no diodo difunda até a região do toróide em tempo menor do que o tempo em que se processa a descarga, afetando o comportamento do plasma produzido no Tokamak. (Ver Figura 1, para visualizar melhor o projeto.) As características principais do dispositivo ETA estão resumidas na Tabela 2.

TABELA 2

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO TOKAMAK ETA

CAMPO MAGNÉTICO TOROIDAL .....	~12kG.
CAMPO VERTICAL .....	~600G.
CORRENTE DE PLASMA .....	~100kA.
RAIO MAIOR .....	~50cm.
RAIO MENOR .....	~25cm.
RAZÃO DE ASPECTO .....	~2.
DENSIDADE DE PLASMA NO FIM DO "START-UP" .....	~ $10^{13}\text{cm}^{-3}$ .
TEMPERATURA DO PLASMA NO FIM DO "START-UP" .....	~20eV.

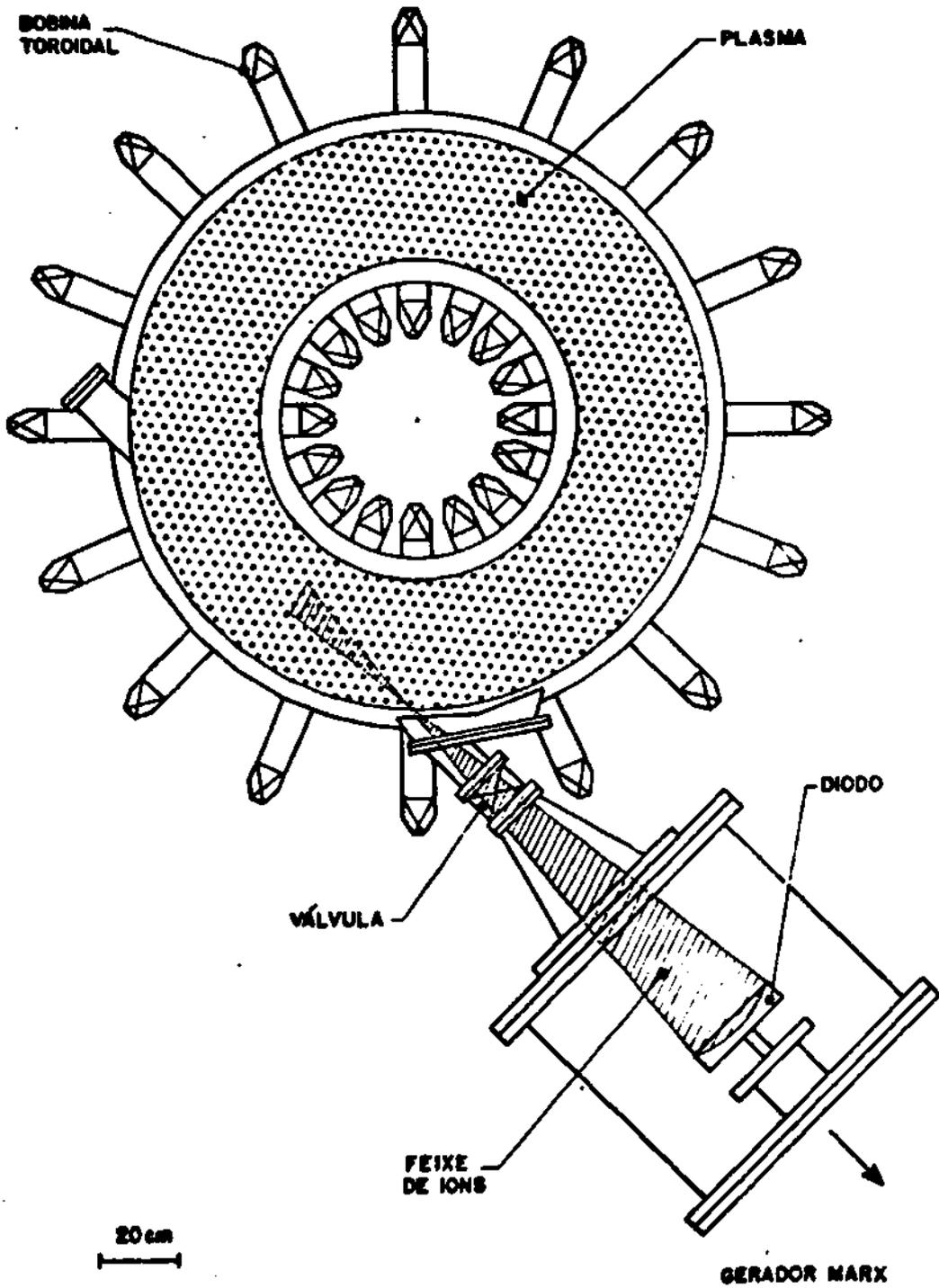


Fig. 1 - Esquema do experimento de injeção de feixe intenso de íons no Tokamak ETA.

Uma vez que tenha penetrado a região do campo de confinamento do plasma, o feixe deve permanecer capturado no interior do toróide. Esta captura será efetuada drenando a polarização do feixe, por interação com um plasma no eixo do toróide formado antes da injeção do feixe. Fisicamente, a separação de carga superficial no feixe é anulada por ação de blindagem do plasma pré-formado. Esta despolarização do feixe pelo plasma ainda não é bem entendida quantitativamente, mas já existem resultados experimentais que evidenciam o fenômeno (Katzenstein et al., 1983; Wickam and Robertson, 1983).

Supondo que o feixe capturado se mantenha confinado no Tokamak, podemos estimar o número de voltas ao longo do toro que o feixe completará até se extinguir. Usando a fórmula de "slowdown" do íon pelo plasma alvo, fornecida por Dawson et al. (1971),

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{4\pi e^4 \ln \Lambda}{V} \left[ \frac{n_i}{M_i} + \frac{4n_e}{3\pi M_B} \sqrt{\frac{m}{M_B}} \left( \frac{W}{T_e} \right)^{3/2} \right], \quad (3)$$

em que  $W$  é a energia do íon do feixe e  $V$  a sua velocidade cuja massa é  $M_B$ ,  $n_i$  é a densidade dos íons do plasma cuja massa é  $M_i$ ,  $n_e$  é a densidade dos elétrons de massa  $m$  e temperatura  $T_e$ , pode-se estimar o tempo característico  $\tau_w$  de perda de energia do feixe. Supondo que a densidade do feixe caia para  $n_f = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  após a captura (devido à expansão do feixe depois de passar pelo foco), que o plasma tenha uma temperatura eletrônica de 20eV, densidade eletrônica  $n_e = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , e tomando  $\ln \Lambda \sim 20$ , encontramos  $\tau_w = 140 \mu\text{s}$ . O tempo de termalização do feixe estimado é de 1,4ms, e o feixe completaria cerca de 600 voltas.

#### 4 - PROJETO PRELIMINAR DO INJETOR DE ÍONS IPE

O rápido desenvolvimento dos geradores de feixe intenso de íons, recentemente viabilizados (1973), foi possível graças a dois fatores essenciais: a disponibilidade de uma tecnologia de pulso de alta potência, já bastante desenvolvida, e a demonstração do controle de fluxo de elétrons no "gap" de um díodo de íons. O diagrama de blocos da Figura

2 indica como os pulsos de alta potência de diferentes durações podem ser gerados e utilizados na produção de feixes. Uma fonte de potência D.C. de baixa corrente (mA) é usada para carregar o banco de capacitores do Gerador Marx, que é disparado por um pulso de gatilho. Para obter pulsos com duração de 100ns (passo 1), usa-se uma linha de transmissão, a qual é carregada pelo pulso gerado no terminal do Marx. Experimentos recentes têm demonstrado que é possível encurtar tais pulsos até 10-20ns (passo 3), com a instalação adicional de chaves abertas a plasma (Meger et al., 1983). Para obter pulsos longos (>1µs), utiliza-se o gerador Marx com (passo 2) ou sem (passo 4) rede de formação de pulsos.

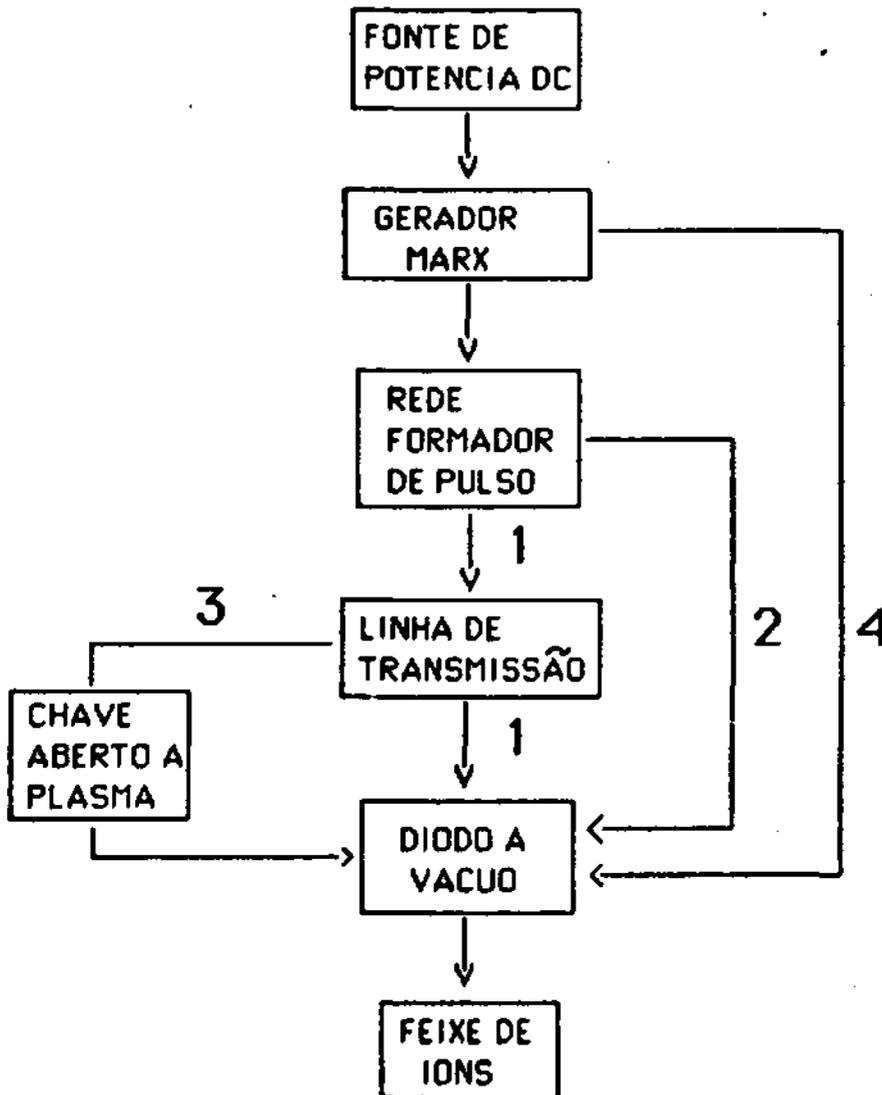


Fig. 2 - Diagrama de blocos do injetor de íons.

Os geradores de feixe intenso de íons com duração menor do que 100ns estão atualmente sendo usados principalmente em estudos relacionados com fusão por confinamento inercial. Os que possuem pulsos longos estão sendo usados na geração de configurações de campo reverso via anel de íons e em aplicações na área de ciência de materiais; estão também sendo considerados para ser usados em aquecimento e estabilidade de plasma confinados magneticamente. O injetor de íons energéticos para aquecimento do Tokamak ETA se enquadrará na categoria do grupo com o passo 4 no diagrama de blocos da Figura 2, ou seja, será um gerador Marx de baixa indutância, sem linha de pulso, ao qual acoplaremos um diodo a vácuo emissor de íons.

#### 4.1 - GERADOR DE PULSO DE ALTA POTÊNCIA

O nosso objetivo no projeto do injetor aqui proposto é gerar no "gap" do diodo um pulso de pico de cerca de 500kV, com duração de mais de 1µs, valendo-nos do acoplamento direto de um gerador Marx de baixa indutância ao diodo. O gerador Marx a ser construído consistirá em 10 capacitores, cada um com capacitância de 1,9µF, que serão carregados a uma tensão máxima de 60kV, para armazenar cerca de 33kJ de energia. Estes capacitores serão lentamente carregados em paralelo (algumas dezenas de segundos) e rapidamente descarregados em série (poucos microssegundos), neste último caso por meio de um chaveamento com chaves do tipo "spark gap" pressurizado. Estimamos que cerca de 20kJ da energia armazenada seja transformada em energia direcionada do feixe de íons. Para referência, compare-se esta energia com a que se pretende injetar no dispositivo ETA sob forma de ondas de radiofrequência, que é da ordem de 100kJ (1MW, 100ms). O circuito simplificado do gerador Marx está representado na Figura 3. Os capacitores  $C_i$  serão carregados em paralelo por fontes de potência indicadas por + e -, através de resistores de carregamento  $R_C$ , como indicado na figura. Os resistores  $R_B$  são introduzidos com a finalidade de assegurar a estabilidade do circuito. As duas primeiras chaves do tipo "spark gap" pressurizadas serão fechadas por um gatilho de 50kV de pulso. A seguir, as chaves restantes se autodisparam consecutivamente devido ao fato de os "gaps" dessas chaves estarem com voltagens acima da voltagem de ruptura daqueles "gaps". Esta sobrevoltagem dos "gaps" é cau

sada pela multiplicação da voltagem do pulso que se propaga pelos estágios consecutivos do Marx. A chave de descarregamento entrará em ação quando ocorrerem falhas no circuito de disparo das chaves, para prevenir a possível descarga da energia armazenada no Marx por vias não desejadas.

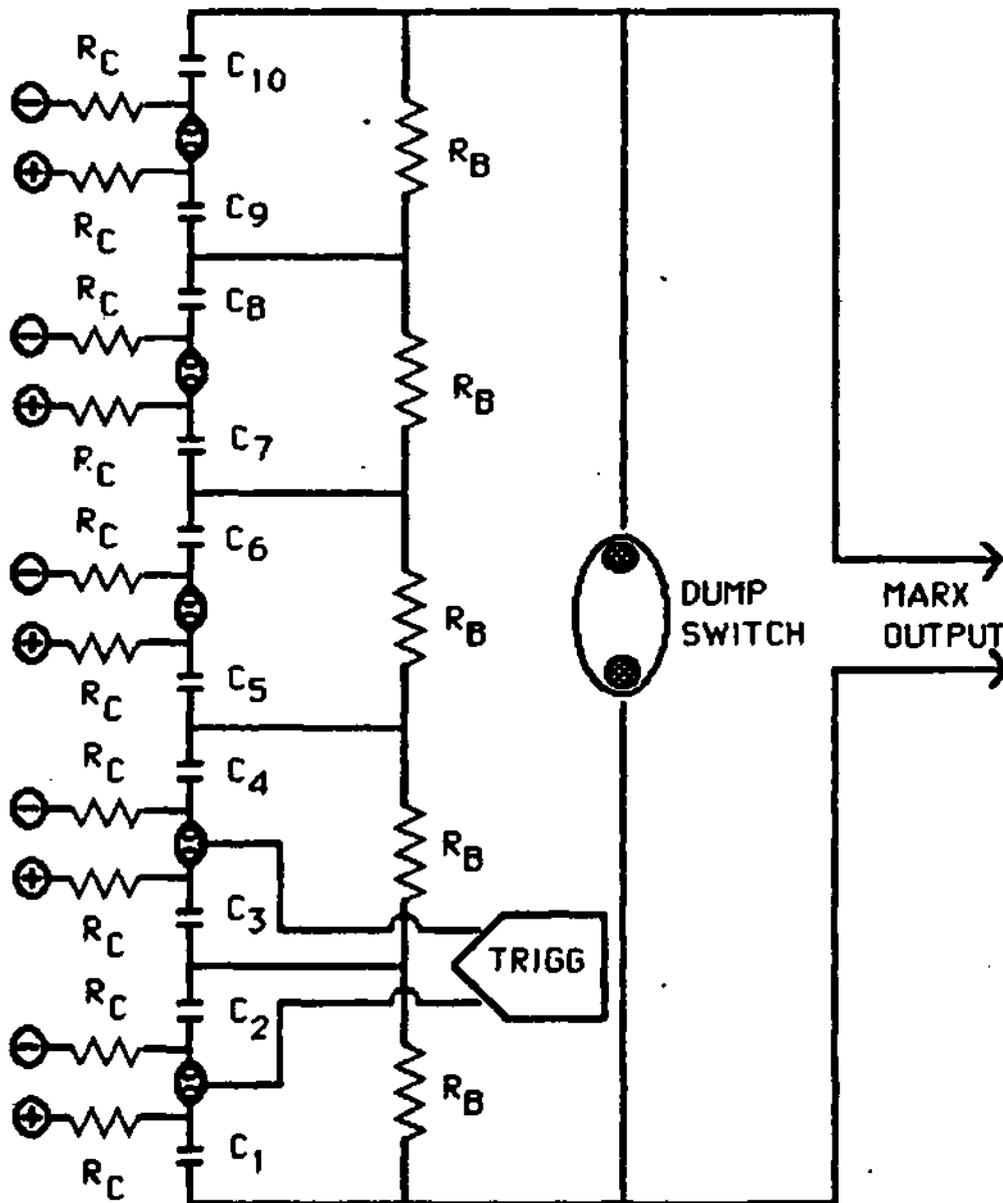


Fig. 3 - Circuito simplificado de um gerador Marx de 10 estágios.

A Figura 4 mostra o esquema simplificado do gerador Marx proposto. O Marx será imerso em óleo de transformador para fins de isolação das partes componentes. Uma interface dielétrica será usada para separar a região com óleo da região de vácuo, onde se instalará o diodo. Por simplicidade, não estão indicados na figura os controladores para carregamento do Marx, os circuitos de disparos das chaves, o sistema de distribuição de gases e o sistema de bombeamento e reservatório de óleo. As características principais do gerador de pulso de alta voltagem estão resumidas na Tabela 3.

TABELA 3

CARACTERÍSTICAS DO GERADOR DE PULSO DE ALTA VOLTAGEM

TIPO .....	gerador Marx de baixa indutância, sem linha de transmissão.
VOLTAGEM DE PICO .....	600kV.
DURAÇÃO DE PULSO .....	>1 $\mu$ s.
BANCO DE CAPACITORES .....	10 capacitores rápidos de 1,9 $\mu$ F cada um, com 60kV de carga máxima.
ARMAZENAMENTO TOTAL DE ENERGIA .....	máximo de 33kJ.
CHAVES .....	"spark gap" pressurizado.
ENGATILHAMENTO DAS CHAVES .....	pulso de 50kV produzido por um sistema PT-55 ou similar.
ISOLAÇÃO DE ALTA VOLTAGEM .....	óleo de transformador.

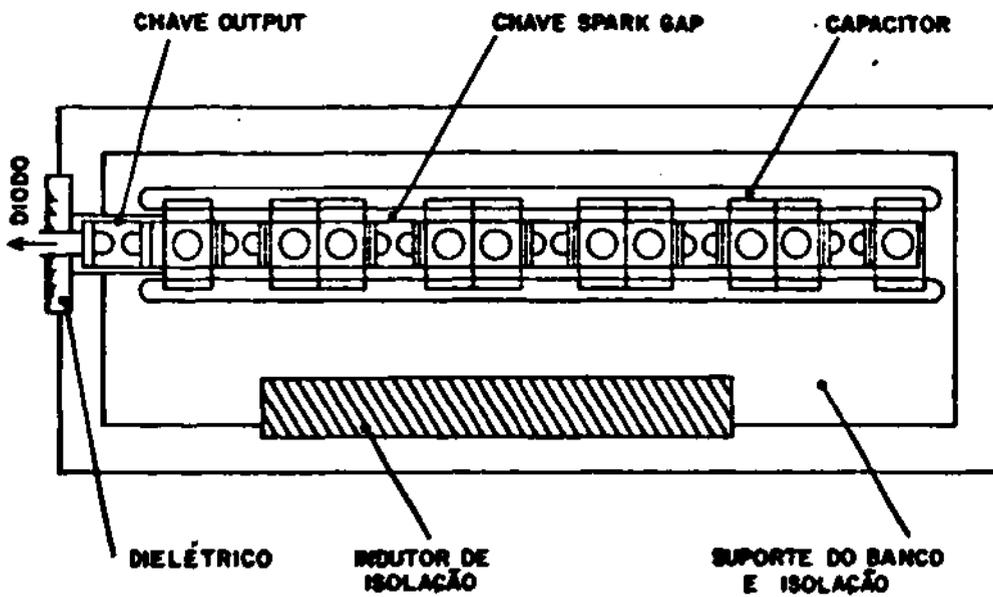


Fig. 4 - Esquema do gerador Marx a ser usado no injetor IPE.

#### 4.2 - DIODO MAGNETICAMENTE ISOLADO COM UM PLASMA DE ANODO ATIVO COM GEOMETRIA ESFÉRICO-ANULAR PARA FOCALIZAÇÃO DO FEIXE

O diodo a ser construído é do tipo magneticamente isolado com geometria focalizadora de íons. Será do tipo "nonflashboard" e o plasma de anodo será produzido pela descarga indutiva de um gás injetado por uma válvula rápida, de modo independente do pulso de alta voltagem. O diodo será denominado CIPAA (Concentrador de Íons com Plasma de Anodo Ativo) e será uma variação de um diodo desenvolvido anteriormente por um dos autores deste projeto (Ueda, 1986). A Figura 5 mostra esquematicamente o diodo proposto, que consistirá basicamente em: 1) bobina lenta para isolamento do diodo; 2) bobina rápida para produção e aceleração do plasma de anodo; 3) válvula de gás rápida e o "nozzle" acompanhante; 4) sistema de grades no anodo e catodo. O feixe produzido pelo diodo CIPAA terá geometria anular e se concentrará a uma distância  $f$  do anodo, de cerca de 1m. As características principais do diodo estão resumidas na Tabela 4.

O projeto do diodo CIPAA será baseado em duas inovações fundamentais: produção de feixe de íons usando anodo "nonflashboard" e focalização do feixe produzido por este tipo de diodo não-convencional. A utilização de um plasma produzido pela descarga induzida de gás no anodo permitirá não só o aumento da densidade de corrente extraída, como também a considerável melhora da pureza e uniformidade do feixe e a capacidade de repetição do diodo. Além disso, como no CIPAA se poderá obter um "turn-on" imediato do feixe com alta voltagem aplicado no diodo, o pulso terá total aproveitamento, em contraste com o diodo que usa "flashboard", no qual até 1/3 do pulso usado para produzir o plasma de anodo pode ser desperdiçado. Procurou-se maximizar a área de extração do feixe ( $\sim 400 \text{ cm}^2$ ), que, aliado à capacidade de produção de alta densidade de corrente deste diodo ( $\sim 500 \text{ A/cm}^2$ ), permitirá a extração de um grande número de partículas num único pulso ( $\sim 10^{18}$ ). Note-se que a focalização do feixe favorecerá a condição  $(w_{D1}/\Omega_i)^2 \gg 1$ , bem como a penetração do feixe no campo do Tokamak.

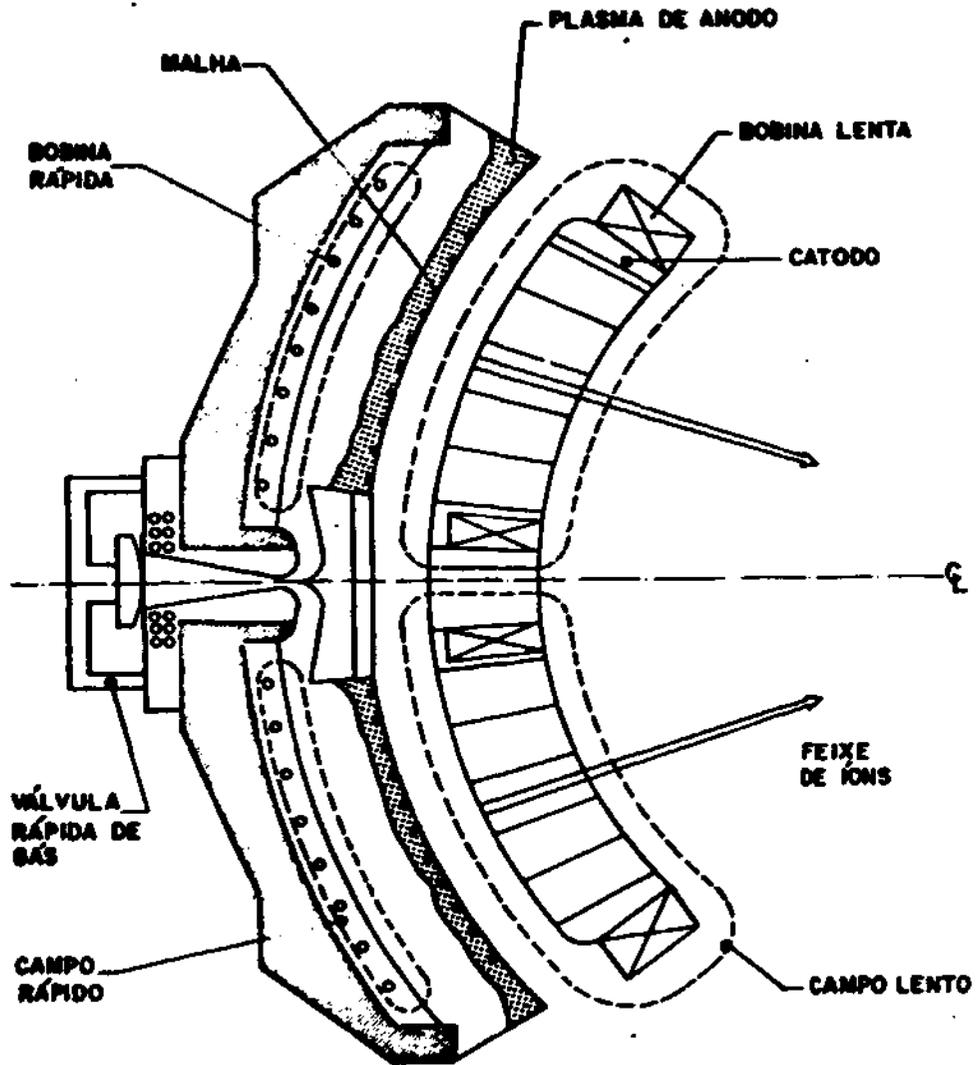


Fig. 5 - Desenho esquemático do diodo CIPAA.

TABELA 4

CARACTERÍSTICAS DO DIODO CIPAA PARA EXTRAÇÃO DO FEIXE DE IONS

ENERGIA DOS IONS EXTRAÍDOS .....	cerca de 500keV.
DURAÇÃO DE PULSO DO FEIXE DE IONS .....	>1 $\mu$ s.
DISTÂNCIA DO "GAP" ANODO-CATODO .....	cerca de 1cm.
TIPO DE IONS .....	variável de acordo com o gás usado, mas com H <sup>+</sup> para aplicação no ETA.
PUREZA DO FEIXE .....	>80%.
CAPACIDADE DE REPETIÇÃO .....	>1000 vezes.
TAXA DE REPETIÇÃO .....	1 pulso/5 min.
DIVERGÊNCIA DO FEIXE .....	$\phi_{1/2} < 3^{\circ}$ .
DENSIDADE DE CORRENTE DE IONS NO DIODO .....	500A/cm <sup>2</sup> .
ÁREA ÚTIL DO DIODO .....	400cm <sup>2</sup> .
CORRENTE TOTAL DE IONS .....	200kA.
GEOMETRIA DO DIODO .....	esférico-anular para focalização do feixe (distância focal de 1m).
BOBINA LENTA PARA ISOLAÇÃO DO "GAP" .....	pulsado com T = 1 $\mu$ s, instalado no lado do catodo.
BOBINA RÁPIDA PARA PRODUÇÃO DE PLASMA DE ANODO .....	pulsado com T = 4 $\mu$ s, 1 ou multiturno.
INJEÇÃO DE GÁS .....	injeção rápida com válvula "puff".
PRÉ-IONIZAÇÃO .....	por um campo induzido, produzido por uma bobina rápida na saída do gás.

A seqüência de operação do nosso diodo será a seguinte:

- 1) Energiza-se primeiramente a bobina de isolamento do diodo.
- 2) Aciona-se a válvula "puff" e injeta-se o gás hidrogênio na região frontal da bobina rápida.
- 3) Quando o gás tiver atingido uma distribuição ótima para o funcionamento da fonte (cerca de 100mTorr em frente da bobina rápida e menos de 1mTorr no "gap") dispara-se o pré-ionizador.
- 4) Aciona-se então a bobina rápida, o que causa a descarga do gás, e acelera-se o plasma assim produzido em direção ao "gap" do diodo.
- 5) Finalmente, aplica-se o pulso de alta voltagem no "gap" para a extração do feixe intenso.

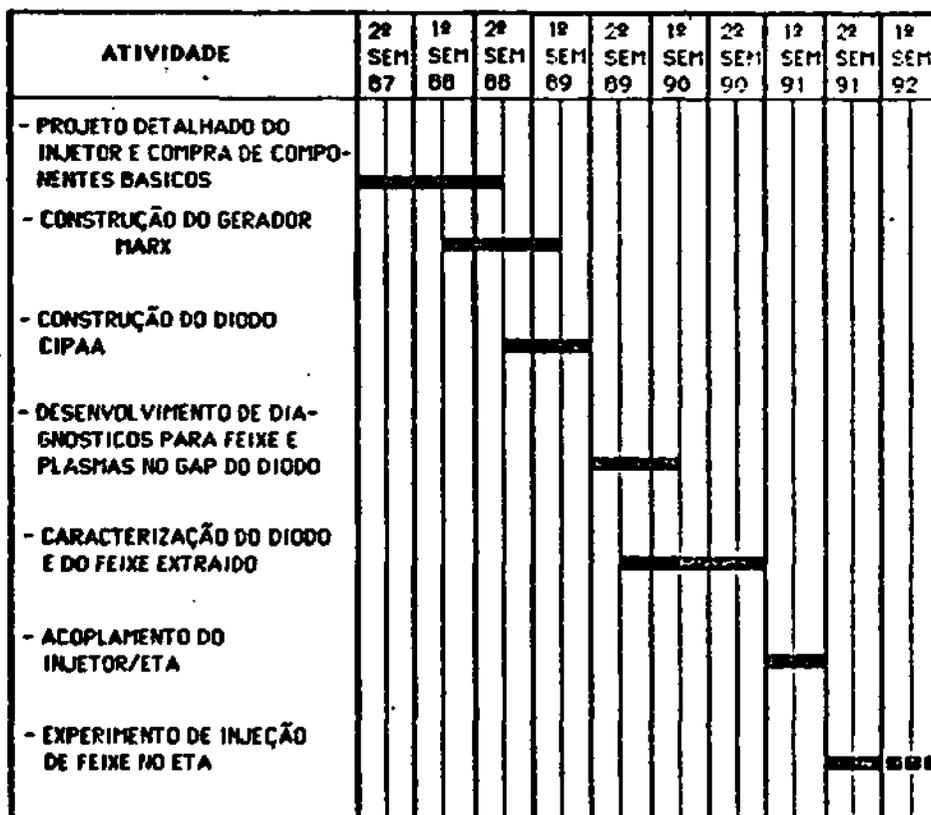
Os tempos de atraso de cada uma das componentes do diodo serão controlados por um gerador de atraso com vários canais.

O diodo será instalado numa câmara de vácuo conectada à câmara toroidal. A região do diodo será evacuada à pressão de base da ordem de  $10^{-7}$ Torr, por meio de uma bomba difusora com "trap" de nitrogênio ou uma bomba turbomolecular. Serão também instaladas uma bomba de vácuo para bombeamento diferencial necessário para manter pressões de  $10^{-4}$ Torr no toróide, enquanto são injetados  $10^{-1}$ Torr na fonte de plasma, e uma válvula pneumática para separar a câmara de vácuo do toróide do injetor, quando este último não estiver sendo operado.

O acoplamento do injetor ao Tokamak ETA será realizado segundo o esquema mostrado na Figura 1.

**5 - CRONOGRAMA DA EXECUÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO PROJETO IPE E EXPERIMENTO NO ETA**

O cronograma da construção e realização do experimento de injeção do feixe intenso de íons no dispositivo ETA está mostrado na Figura 6.



**Fig. 6 - Cronograma da execução do experimento de injeção do feixe intenso no Tokamak ETA.**

6 - RELAÇÃO DE PESSOAL PARA INTEGRAR O GRUPO DE FEIXE E ORÇAMENTO DO PROJETO

- 1) Pesquisador experimental responsável pelo projeto.
- 2) Pesquisador responsável pela parte teórica.
- 3) Aluno de mestrado experimental: a ser contratado no 2º semestre de 1987 para trabalhar no desenvolvimento do diodo (término de tese previsto para o 2º semestre de 1990). Também irá trabalhar na montagem do gerador Marx.
- 4) Aluno de mestrado teórico: a ser contratado a partir do 2º semestre de 1988 para trabalhar no estudo dos aspectos teóricos da injeção de feixe no Tokamak ETA.
- 5) Engenheiro Elétrico (carreira de desenvolvimento): a ser contratado de preferência a partir do 2º semestre de 1987 (poderá ser um engenheiro em tempo parcial). Trabalhará no projeto e na construção do gerador Marx e de vários dispositivos elétricos/eletrônicos e participará da operação e manutenção do injetor, bem como da construção de sistemas de diagnósticos do feixe, plasma fonte e plasma alvo.
- 6) Físico experimental em tempo parcial, para auxiliar no projeto e construção do injetor.
- 7) Aluno de doutoramento experimental: a ser contratado a partir do 2º semestre de 1990 para trabalhar na parte experimental referente à injeção de íons no Tokamak ETA.
- 8) Físico ou Engenheiro Doutor (experimental).
- 9) Técnico eletrônico.
- 10) Técnico mecânico.

11) Pesquisador visitante.

12) Pesquisador visitante estrangeiro.

Estima-se que os orçamentos para a construção do injetor de íons e para o sistema de acoplamento do injetor ao Tokamak são da ordem de US\$ 500.000 e US\$ 150.000, respectivamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R.J.; PICRAUX, S.T. Repetitively pulsed metal ion beams for ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B6:123-128, 1985.
- ARANCHUK, L.E. et al. Status of REB-Generator driven inertial confinement fusion. *Proceedings of the 9th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Baltimore, U.S.A., 1-8 Sep. 1982. (IAEA-CN-41/N-5).
- BALDOCK, P.; CHALLIS, C.D.; CHOI, P.; COPPINS, M.; DANGOR, A.E.; DEENEY, C.; FIGURA, E.; FOLKIERSKI, A.; HAINES, M.G.; RICKARD, G.J. Z-pinch experiments and theory. *Proceedings of the 11th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Kyoto, Japan, 13-20 Nov. 1986.
- BAGLIN, J.E.E.; HODGSON, R.T.; CHU, W.K.; NERI, J.M.; HAMMER, D.A.; CHEN, L.J. Pulsed proton beam annealing: Semiconductors and Silicides. *Nuclear Instruments and Methods*, 191:169-176, Dec. 1981.
- BASOV, N.G.; DANILYCHENKO, V.A.; POPOV, Yu.M. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1(18), 1971.
- BUTIRAM, M.T.; PRESTWICH, K.R. High power pulsed accelerators with potential industrial applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B10/11:855-858, May 1985.
- DAWSON, J.M.; FURTH, H.P.; TENNEY, F.H. Production of thermonuclear power by non-Maxwellian ions in a closed magnetic field configuration. *Physical Review Letters*, 26(9):1156-1160, May 1971.
- DREIKE, P.L.; HAMMER, D.A.; SUDAN, R.N.; WILEY, L.G. Generation and propagation of an intense rotating proton beam. *Physical Review Letters*, 41(19):1328-1331, Nov. 1978.
- FAJANS, J.; BEKEFI, G.; YIN, Y.Z.; LAX, B. Microwave studies of a tunable free electron laser in combined axial and wiggler magnetic fields. *Plasma Fusion Center and Research Laboratory of Electronics*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, Dec. 1984, 58 p. (PFC/JA-84-41).

FURTH, H.P. Enhancement of confinement in Tokamaks. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 28(9a):1305-1317, Sep. 1986.

GRANASTEIN, V.L.; HERDON, M.; CARMEL, Y.; NATION, J.A. Gigawatt microwave emission from an intense relativistic electron beam. *Laboratory of Plasma Studies*, Cornell University, Ithaca, NY 14850, Oct. 1973, 11 p. (LPS 137).

GREENSPAN, M.A.; EKDAL, C.; SETHIAN, J.D.; WHARTON, C.B. Plasma heating by an intense relativistic electron beam: an experimental study. *Physics of Fluids*, 23(1):205-219, Jan. 1980.

HERSHCOVITCH, A.I.; KOVARIK, V.J.; PRELEC, K. High-intensity  $H^-$  ion source with steady-state plasma injection. *Review of Scientific Instruments*, 57(5):827-830, May 1986.

HODGSON, R.T.; BAGLIN, J.E.E.; PAL, R.; NERI, J.M.; HAMMER, D.A. Ion beam annealing of semiconductors. *Applied Physics Letters*, 37(2):187-189, July 1980.

HUMPHRIES, S.Jr. Intense pulsed ion beams for fusion applications. *Nuclear Fusion*, 20(12):1549-1612, Dec. 1980.

IKEHATA, T.; KANABE, T.; MIYOSHI, S. Formation of a rotating ion layer by normal injection of 90-keV pulsed ion beam. *Journal of Applied Physics*, 59(1):80-86, Jan. 1986.

ISHIZUKA, H.; ROBERTSON, S. Propagation of an intense charge-neutralized ion beam transverse to a magnetic field. *The Physics of Fluids*, 25(12):2353-2358, Dec. 1982.

JET TEAM. JET latest results and future prospects. *Proceedings of the 11th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Kyoto, Japan, 13-20, Nov. 1986.

KAMADA, K.; OKADA, C.; IKEHATA, T.; ISHIZUKA, H.; MIYOSHI, S. Propagation of intense pulsed ion beams across a magnetic field. *Journal of Physical Society of Japan*, 46(6):1963-1964, June 1979.

- KATZENSTEIN, J.; ROBERTSON, S.; ROSTOKER, N. Injection and trapping of an intense energetic ion beam in a Tokamak. *Proceedings of the 5th International Conference on High-Power Particle Beams*, held at San Francisco, California, U.S.A., Sep. 12-14, 1983.
- LITWIN, C.; SUDAN, R.N.; TURNBULL, A.D. Stabilization of the Spheromak tilt instability. *The Physics of Fluids*, 27(12):2791-2793, Dec. 1984.
- MANHEIMER, W.M.; WINSOR, N.K. Injection of intense pulsed-ion beams into Tokamaks with application to plasma heating and current maintenance. *Nuclear Fusion*, 21(12):1559-1571, Dec. 1981.
- MEGER, R.A.; COMISSO, R.J.; COOPERSTEIN, G.; GOLDSTEIN, S.A. Vacuum inductive store/pulse compression experiments on a high power accelerator using plasma opening switches. *Applied Physics Letters*, 42(11):943-945, June 1983.
- MOHRI, A.; NARIHARA, K.; TOMITA, Y.; TSUZUKI, T.; KABEYA, Z.; AKAISHI, K.; MIYAHARA, A. High power ion-irradiation test for CTR first walls. *Japanese Journal of Applied Physics*, 19(4):L174-L176, Apr. 1980.
- NATION, J.A. High-power electron and ion beam generation. *Particle Accelerators*, 10:1-30, 1979.
- OSWALD, R.B.Jr.; McLEAN, F.B.; SHALLHORN, D.; BUXTON, L.O. One-dimensional thermoelastic response of solids to pulsed energy deposition. *Journal of Applied Physics*, 42(9):3463-3473, Aug. 1971.
- ÖTT, E.; MANHEIMER, W.M. Cross-field injection, propagation, and energy deposition of intense ion beams with application to Tokamak plasma heating. *Nuclear Fusion*, 17(5):1057-1065, Oct. 1977.
- PETER, W.; ROSTOKER, N. Theory of plasma injection into a magnetic field. *The Physics of Fluids*, 25(4):730-735, Apr. 1982.
- RAMIRES, J.J.; TOEPFER, A.; CLAUSER, J. Pulsed power applications to intense neutron source development. *Nuclear Instruments and Methods*, 145:179-183, Sep. 1977.

- ROBERTSON, S.; ISHIZUKA, H.; PETER, W.; ROSTOKER, N. Propagation of an intense ion beam transverse to a magnetic field. *Physical Review Letters*, 47(7):508-511, Aug. 1981.
- ROSTOKER, N.; RAHMAN, H.U. Nonthermal reactors based on intense neutralized ion beams. *Comments on Plasma Physics and Controlled Fusion*, 10(2):81-89, Jul. 1986.
- SCHMIDT, G. Plasma motion across magnetic fields. *The Physics of Fluids*, 3(6):961-965, Nov.-Dec. 1960.
- SPRANGLE, P.; COFFEY, T. New high power coherent radiation sources. *Naval Research Laboratory*, Washington, D.C., 45 p., Jan. 1984. (NRL Rep. 5224).
- UEDA, M. *Intense ion beam from a magnetically insulated diode with an active anode source*. Doctoral Thesis. Cornell University, Ithaca, NY 14850, Aug. 1986.
- WICKAM, M.; ROBERTSON, S. Cross field injection and trapping of a continuous plasma beam in a magnetic mirror. *Plasma Physics*, 25(1): 103-110, Jan. 1983.
- WILEY, L.G.; HAMMER, D.A. Intense proton beam excitation of the high pressure Ar/N<sub>2</sub> laser. *Journal of Applied Physics*, 54(9):4806-4820, Sep. 1983.
- YONAS, G. *Particle Accelerators*, 5(81), 1973.
- YONAS, G.; TOEPFER, J. *Gaseous Electronics*, vol. 1, chap. 6, p. 399-452, 1978.
- ZIEGLER, J.F. Comunicação pessoal a M. Ueda, em fev. 1987.