

SISTEMA DE VÁCUO DE GRANDE PORTE UTILIZADO
EM EXPERIÊNCIAS DE CONFINAMENTO MAGNÉTICO DE
PLASMAS

R.Y. Honda, M.E. Kayama, H.K. Böckelmann e
S. Aihara

Instituto de Física "Gleb Wataghin", UNICAMP
C.P. 6165, Campinas - Sp.

Apresentamos neste trabalho, suscintamente, o princípio de funcionamento de um sistema θ -pinch, sistema este capaz de gerar e confinar plasmas de altas densidades e temperaturas.

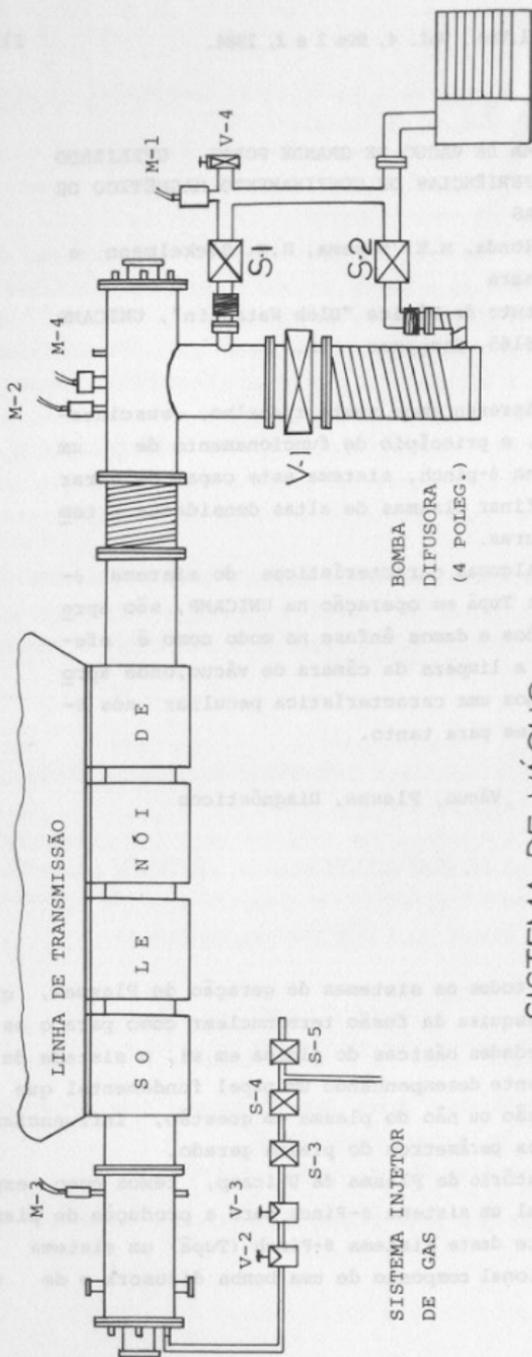
Algumas características do sistema θ -pinch Tupã em operação na UNICAMP, são apresentados e damos ênfase no modo como é efetuada a limpeza da câmara de vácuo, onde aproveitamos uma característica peculiar aos θ -pinches para tanto.

Vácuo, Plasma, Diagnósticos

1. INTRODUÇÃO

Em quase todos os sistemas de geração de Plasmas, quer seja para a pesquisa da fusão termonuclear como para o estudo das propriedades básicas do plasma em si, o sistema de vácuo está presente desempenhando um papel fundamental que implica na geração ou não do plasma em questão, influenciando diretamente nos parâmetros do plasma gerado.

No Laboratório de Plasma da Unicamp, temos como experiência central um sistema θ -Pinch para a produção de plasma. Constitui parte deste sistema θ -Pinch (Tupã) um sistema de vácuo convencional composto de uma bomba difusora e de uma



SISTEMA DE VÁCUO
 Ø-PINCH - TUPÃ

FIG. 1

bomba mecânica além da câmara de vácuo e do sistema de válvulas como requer qualquer circuito de vácuo. (fig. 1) e tabela (1).

Tabela 1 - Sistema de Vácuo - θ -Pinch - Tupã

- 1) Bomba Mecânica - 2 estágios - vazão de 600 l/min.
- 2) Bomba Difusora - 4 polegadas - vazão de 800 l/s.
- 3) Medidores de Vácuo: 1 Penning - (M-4)
3 pirani (M-1, M-2, M-3)
- 4) Duas válvulas solenóide (s-1) e (s-2)
Uma válvula pneumática (gaveta) (V-1)
- 5) Câmara de Vácuo - Pirex - Aço Inox
Volume total = 50 litros
Pressão mínima = 5×10^{-6} torr
Pressão de Operação = 2 a 10m torr
Gás - Hélio

Sistema θ -Pinch - Tupã

O sistema θ -Pinch sem o plasma constitui-se basicamente num circuito RLC e como tal, suas características elétricas podem ser obtidas através do circuito equivalente abaixo:

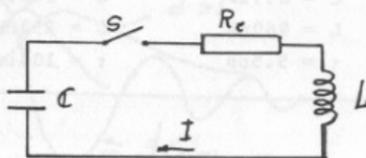
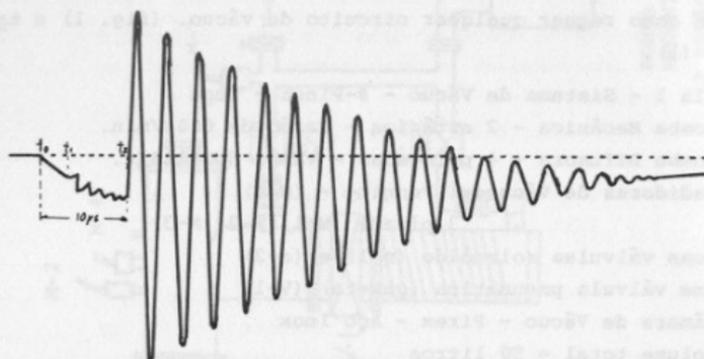


FIG. 2 - Circuito Equivalente de um Sistema θ -Pinch (Sem Plasma)

A equação que rege a descarga do banco de capacitores através do circuito sem o plasma é dada por:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = 0$$

FIG. 5 - DESCARGA TÍPICA DO SISTEMA θ -PINCH TUPÃ

A tabela 2 apresenta as características elétricas dos três bancos de capacitores que constituem o sistema θ -Pinch Tupã.

SISTEMA THETA-PINCH TUPÃ

BANCO PRINCIPAL	BANCO PRÉ-AQUECIMENTO	BANCO POLARIZAÇÃO	SOLENÓIDE
V = 100KV	V = 50KV	V = 10KV	I = 1,0m
C = 11.1 μ F	C = 0.7 μ F	C = 180 μ F	\varnothing = 16.0 cm
L = 48nH	L = 960nH	L = 250nH	L = 13nH
E = 55KJ	τ = 5.5 μ s	τ = 104 μ s	
\dot{t} = 4.8 μ s			

(Tabela-2)

Dinâmica de geração de plasma no sistema θ -pinch

Uma vez ionizado, o gás torna-se diamagnético, ou seja, como um bom condutor de corrente, no plasma surgirá uma corrente imagem da corrente externa (corrente no solenóide, devida à descarga do banco principal de capacitores), esta corrente imagem tentará evitar a variação do campo magnético to

com a equação inicial $p/t=0$ $I=0$, C Carregado à V_0 temos que a corrente é dada por:

$$I = \frac{V_0}{L} \left| \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \right| \sin \omega t$$

onde
$$\omega = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}$$

Podemos escrever $\omega = (LC)^{-\frac{1}{2}} (1-d)^{\frac{1}{2}}$ onde $d = \frac{R^2 C}{4L}$ é a constante de amortecimento.

Em termos da constante de amortecimento temos 3 casos:

a) $d < 1$ $\omega = \text{real}$ $I = \frac{V_0}{L} e^{-\frac{Rt}{2L}} \frac{\sin \omega t}{\omega}$

Sistema simplesmente amortecido

b) $d = 1$ $\omega = 0$ não haverá oscilação $I = I_0 e^{-\frac{Rt}{2L}}$

Sistema criticamente amortecido

c) $d > 1$ $\omega = \text{imaginário}$ $I = I_0 e^{-\frac{Rt}{2L}} e^{\pm \omega t}$

onde $\omega = ik$ $I = I_0 e^{-\frac{Rt}{2L}} e^{\pm kt}$ $I = I_0 e^{-\frac{Rt}{2L}} \frac{\sinh kt}{k}$

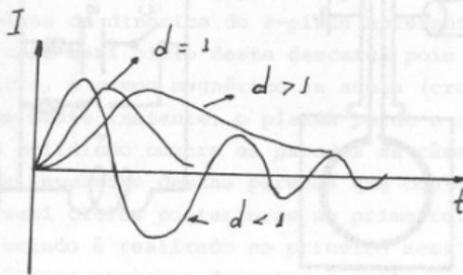


FIG. 3 - Os sistemas θ -pinch operam com $d < 1$.

O sistema θ -pinch tupã opera com três bancos de capacitores como mostra a fig.4 e uma descarga característica é mostrada na fig. 5.

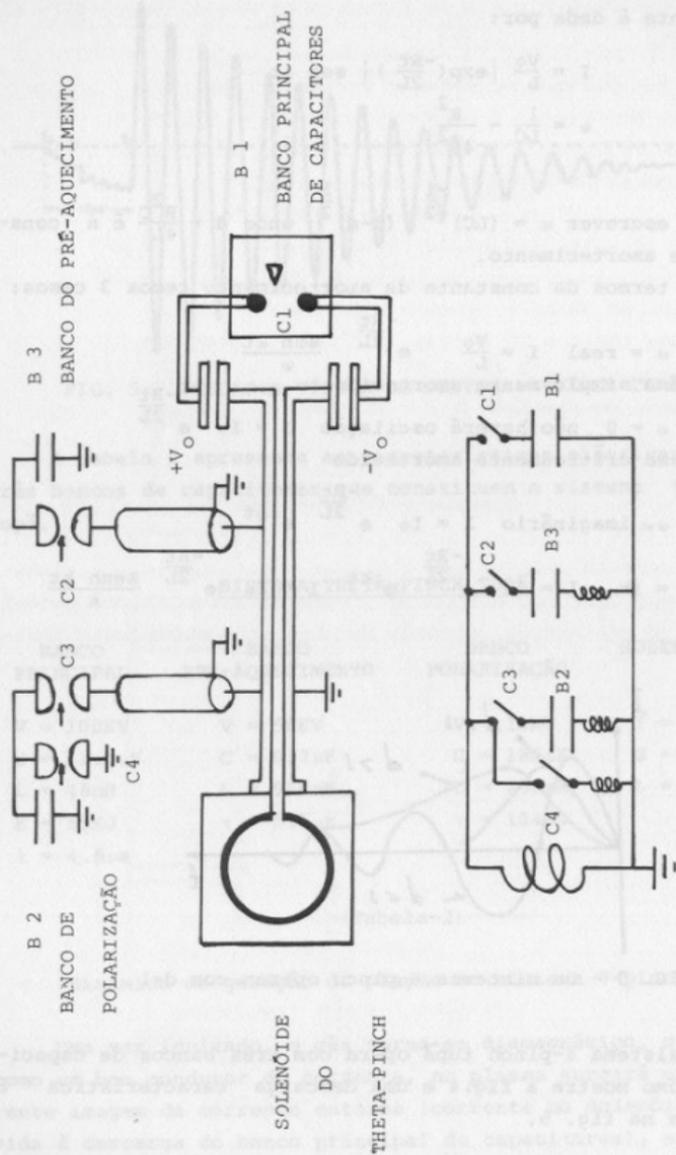


FIG. 4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA THETA-PINCH - TUPÃ

tal do plasma. (fig. 6).

Devido ao fato do plasma ser bom condutor de corrente, esta última se alojará na superfície do mesmo e não permitirá a penetração do campo magnético externo, e este por sua vez, comprimirá o plasma para o centro do tubo.

Sendo o plasma compressível, somente aquelas porções próximas da superfície do plasma responderão a esta compressão, formando uma camada de simetria cilíndrica de plasma que caminha para o centro do tubo, ao passo que o plasma das regiões mais centrais, não sentirão o efeito da compressão enquanto esta camada não passar pelas mesmas.

A força de Lorentz ($\vec{J} \times \vec{B}$) faz com que a camada convirja para o centro.

Nesta fase a maior parte do trabalho produzido pela força eletromagnética é convertida em energia cinética das partículas pertencentes à camada de plasma.

Atrás desta camada forma-se um choque magnético que funciona como um verdadeiro pistão magnético que comprimirá o plasma para o centro do tubo.

Na fig. 6 é mostrado um sinal típico do campo magnético devido ao banco principal de capacitores (senóide amortecida, caso onde $d < l$) do sistema θ -pinch tuipã.

A análise da dinâmica do θ -pinch apresentada acima é válida para cada semi ciclo desta descarga pois no final de cada semi ciclo, o campo magnético se anula (cruza o zero) e pouco antes deste instante, o plasma perde o confinamento e se expande colidindo contra as paredes da câmara de vácuo, e isto libera impurezas destas paredes que contaminam o plasma gerado em semi ciclos posteriores ao primeiro, razão pela qual todo estudo é realizado no primeiro semi ciclo.

Este último processo descrito é utilizado com bastante sucesso para limpeza do sistema de vácuo (câmara de vácuo) como veremos a seguir.

Antes de iniciarmos a tomada de dados do sistema θ -pinch, ligamos obviamente o sistema de vácuo e fazemos passar pelo mesmo o gás de interesse, ou seja, efetuamos uma "lavagem" e posteriormente descarregamos os bancos de capacitores e assim eliminamos os gases residuais retidos nas paredes da câmara

de vácuo.

Uma análise espectral das linhas emitidas pelo plasma, nos revela a eficiência deste processo com a ausência de linhas espectrais das impurezas.

Através de dados obtidos com sondas magnéticas e de uma câmara conversora de imagens (IMACON), pudemos estimar a temperatura do plasma de hélio gerado pelo sistema θ -pinch tupã:

Pressão	Temperatura	
100 m torr	600 ± 150	eV
10 m torr	860 ± 340	eV
1 m torr	$(5,6 \pm 2) 10^3$	eV

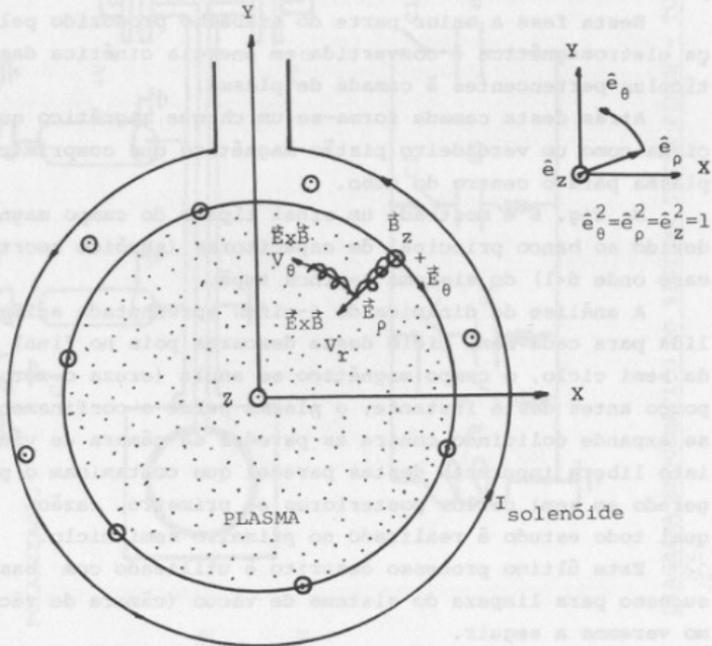
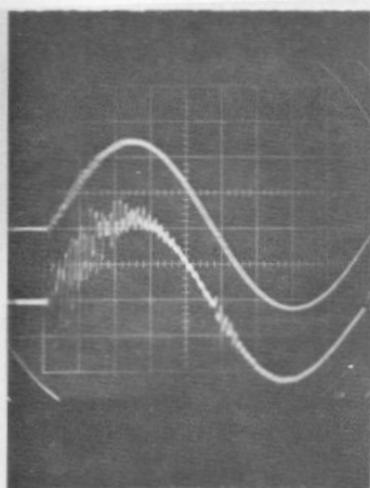


FIG.6 - Trajetória dos elétrons num sistema Theta-Pinch



SINAL DA SONDA MAGNÉTICA
(SEM PLASMA)

Vertical: 0,1 V/div.

Horizontal: 0,5 us/div.

FIG. 6a - Banco Principal

SUPORTE FINANCEIRO: FINEP/CNEN/FAPESP/CNPq