

ESTUDO DE INSTABILIDADES DURANTE A IMPLOÇÃO
NO THETA-PINCH TUPÃ

M.E. Kayama* e H.K. Böckelmann

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

(*) Faculdade de Engenharia de Campinas, De-
partamento de Engenharia Elétrica, UNICAMP
13.100, Campinas, SP

As instabilidades presentes durante a im-
plosão do plasma num Theta-Pinch são uma das
principais fontes de aquecimento do plasma.
Este aquecimento turbulento altera fortemen-
te os perfis do plasma durante a fase de não
equilíbrio termodinâmico da implosão. Utili-
zando um código híbrido e diagnosticando o
plasma por fotografia ultra-rápida e sonda
diamagnética, parâmetros como o tempo de im-
plosão e espessura de camada foram compara-
dos. Da boa concordância entre os valores teó-
rico e experimental pode-se concluir "a priori"
a importância destas instabilidades ao aque-
cimento anômalo do plasma na fase de implo-
são.

Plasma, Instabilidades, Theta-Pinch

1. INTRODUÇÃO

As instabilidades do plasma durante a fase de implosão num Theta-Pinch contribuem de modo significativo no seu aquecimento. Os modelos nos quais as instabilidades não são tomadas em conta, indicam uma temperatura final do plasma aquém do valor verificado experimentalmente¹. O estudo experimen-

tal nesta fase transitória é dificultado pelo estado de não equilíbrio termodinâmico do plasma. Geralmente, a forma usual é a utilização de sondas magnéticas ou métodos ópticos (interferometria, fotografia ultra-rápida). Os resultados comparados a modelos incluindo o transporte anômalo mostram a evidência das instabilidades.

Em nosso trabalho, foi utilizado o método óptico para não introduzirmos perturbações ao plasma. A dinâmica do plasma foi registrada por uma câmara conversora de imagens. A simulação desta implosão foi feita no código AURORA, um código híbrido na qual se acham incorporados os transportes anômalos e um modelo de ionização. Os resultados mostram boa concordância entre o valor teórico e o experimental do tempo da implosão do plasma e da camada de corrente. Embora outras medidas como o mapeamento do campo magnético sejam necessárias, pode-se concluir "a priori" a importância dos efeitos do transporte anômalo na fase de implosão do plasma.

2. TEORIA

As instabilidades presentes durante a implosão do plasma num Theta-Pinch são basicamente: Buneman, íon acústica, híbrida inferior (deslocada) e dois feixes modificada. Estudos anteriores² mostram que as três primeiras são as mais importantes. No código numérico, estas três se acham incorporadas.

A equação dos íons obtida pela equação de Vlasov é dada por:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = q(\vec{E} + \frac{\vec{v}_i \times \vec{B}}{c}) - \vec{F}$$

onde $\vec{F} = e\vec{n}\vec{J}$ é o momento anômalo transferidos dos íons aos elétrons e $\vec{n} (= \vec{\sigma}^{-1})$ é o tensor resistividade.

Os elétrons são tomados como um fluido sem massa. A sua equação, assumindo $n_e = n_i$ é dada por:

$$m_e \frac{d\vec{v}_e}{dt} = 0 = qn_e (\vec{E} + \frac{V_e \times \vec{B}}{c}) - \nabla P_e - n_e \vec{F}$$

As equações de Maxwell são reduzidas a

$$\nabla \times \vec{J} = 0 \quad \nabla \times \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

A condutividade anômala é tomada na forma²:

$$\sigma_{\perp} = n_i \frac{c}{v_{\perp}} + \sigma_{a\perp}$$

onde o primeiro termo é dado pela resistividade de Chodura e o segundo termo anômalo.

O código possui ainda incorporado, um modelo de ionização³. Tendo-se a taxa inicial de ionização, é calculado de forma auto-consistente a evolução desta taxa durante o confinamento.

3. EXPERIÊNCIA

O experimento foi realizado no Sistema Tupã⁴. Foi construído e incorporado neste sistema um banco de capacitores para gerar um campo magnético antiparalelo ao do primeiro semi-ciclo magnético do banco principal. O circuito equivalente do sistema nesta nova condição é mostrado na fig. 1. A tensão final nos bancos foi de 45.0 kV para o pré-aquecimento, 8.0 kV para o de polarização e 30.0 kV para o principal. O perfil resultante da corrente gerada pela descarga aos bancos é mostrado na fig. 2. A intensidade do campo de polarização é de 1.0 kG e o campo máximo do principal é 6,2 kG.

O plasma analisado foi de He a 10 mTorr com uma pressão de base de 8.0×10^{-6} Torr. A ionização do gás em fluxo contínuo foi feita por uma fonte de RF-cw.

Os diagnósticos empregados foram a câmara conversora de imagens e a sonda diamagnética compensada⁵. A câmara foi posicionada transversa ao tubo de plasma. A imagem da dinâmica radial do plasma foi registrada através de uma fenda de 3 mm próxima ao tubo. A sonda foi posicionada a 27 mm do meio plano do solenóide. Seu circuito operacional é mostrado na fig. 3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do raio do plasma obtido pela simulação é mostrada na fig. 4. O instante $t = 0$ corresponde ao início do se

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos, ao Prof. P.H. Sakanaka pelas discussões em diversos tópicos na utilização do código AURORA.

Agradecemos também ao auxílio financeiro do FINEP e da FAPESP.

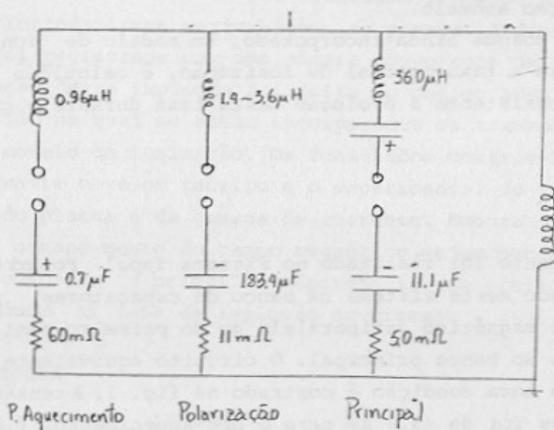


Fig. 1 - Circuito Equivalente do Sistema Tupã

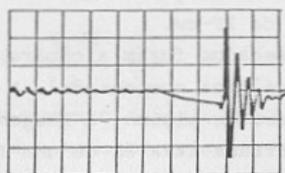
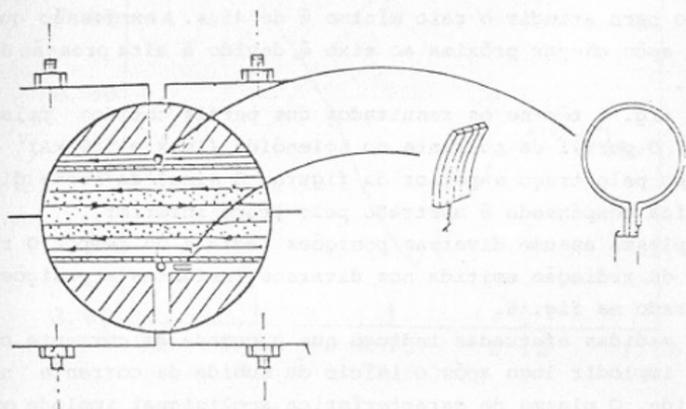
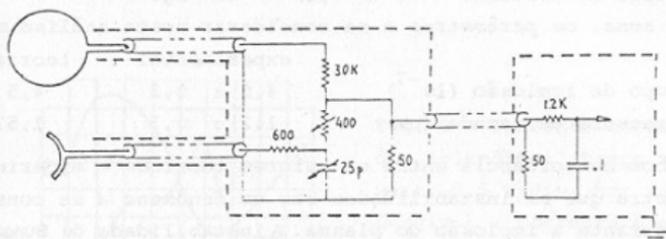


Fig. 2 - Perfil da Corrente no Sistema Tupã
(hor. 10 μ s/div. vert. 0.5 μ s/div.)



(a)



(b)

Fig. 3 - Arranjo experimental (a) e circuito operacional (b) de sonda diamagnética compensada.

mi-ciclo magnético. A camada de corrente se forma no instante $t = 0,35 \mu\text{s}$ e começa a implodir arrastada pelo pistão magnético em direção ao eixo. A espessura da camada é de 1,57 cm. O tempo para atingir o raio mínimo é de $45 \mu\text{s}$. A expressão que ocorre após chegar próxima ao eixo é devido à alta pressão do plasma.

Na fig. 5 têm-se os resultados dos perfis obtidos pelas sondas. O perfil da corrente no solenóide ($I_{\text{max}} = 580 \text{ kA}$) é indicado pelo traço superior da figura. O sinal da sonda dia magnética compensada é mostrado pelo traço inferior.

O plasma assume diversas posições radiais no tempo. O registro da radiação emitida nos diversos instantes e posições é mostrado na fig. 6.

As medidas efetuadas indicam que a camada de corrente começa a implodir logo após o início da subida da corrente no solenóide. O plasma de característica acolisional implode com uma espessura de variada de $(1,2 \pm 0,3) \text{ cm}$. O final da implosão ocorre no instante $(4,0 \pm 0,2) \times 10^{-7} \text{ sg}$.

Em suma, os parâmetros a se considerar nesta análise são:

	experimental	teoria
tempo de implosão (10^{-7})	$4,5 \pm 0,2$	4,5
espessura da camada (cm)	$1,2 \pm 0,3$	1,57

A boa concordância entre os valores teóricos e experimental mostra que as instabilidades são um fenômeno a se considerar durante a implosão do plasma. A instabilidade de Buneman é importante durante toda esta fase em que a velocidade de arrasto é maior que a velocidade térmica dos elétrons. No meio da implosão, a contribuição da íon-acústica é máxima. Sua estabilização ocorre através do desenvolvimento de íons de alta energia que atenuam o espectro da onda. Por fim, a híbrida inferior é praticamente desprezível durante a fase de implosão.

Embora os diagnósticos experimentais fossem restritos, pode-se erguer um perfil da importância e contribuição das instabilidades durante a implosão do Theta-Pinch. Outros diagnósticos (em aplicação) fornecerão mais detalhes das propriedades exibidas pelo plasma durante esta fase de confinamento.

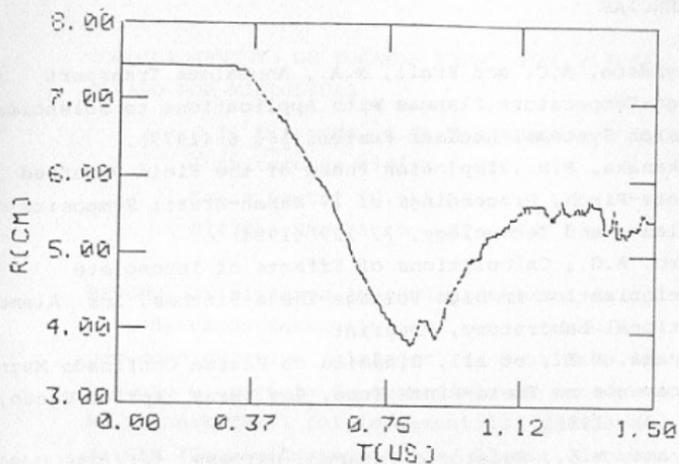


Fig. 4 - Variação do raio do plasma por simulação numérica.

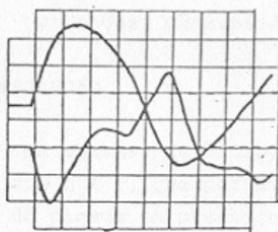


Fig. 5 - Corrente através dos solenóides (traço sup. vert. 0.5 V/div. hor. 0.5 μ s/div.) e corrente diamagnética do plasma (traço inf. vert. 0.5 V/div. hor. 0.5 μ s/div.).

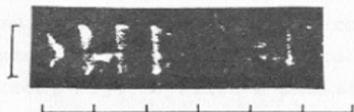


Fig. 6 - Fotografia da Câmara Conversora de Imagens (hor.: 1.0 μ s/div., vert. 15.0 cm/div.).

REFERÊNCIAS

1. Davidson, R.C. and Krall, N.A., Anomalous Transport in High-Temperature Plasmas with Applications to Solenoidal Fusion Systems, Nuclear Fusion, 17, 6 (1977).
2. Sakanaka, P.H., Implosion Phase of the Field Reversed Theta-Pinch, Proceedings of IV Japan-Brazil Symposium on Science and Technology, 3, 129 (1984)
3. Sgro, A.G., Calculations of Effects of Incomplete Preionization in High Voltage Theta-Pinches, Los Alamos National Laboratory, Preprint.
4. Kayama, M.E., et all, Dinâmica do Plasma Confinado Magneticamente no Theta-Pinch Tupã, Rev. Bras. Aplic. Vácuo, 5, (1, 2) (1985).
5. Kayama, M.E., Relatório Interno, UNICAMP, jul/1986, (1986).