MÁQUINA DE PLASMA QUIESCENTE COM CONFINAMENTO MULTIPOLO MAGNÉTICO PARA GERA-ÇÃO E DETEÇÃO DE ONDAS DE LANGMUIR

> José Leonardo Ferreira, Edevaldo Donizetti de Campos\* e Julio Guimarães Ferreira

Laboratório Associado de Plasmas Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE 12201-São José dos Campos-SP \*Aluno de mestrado do ITA/CAPES

# RESUMO:

Neste trabalho serão apresentados os resultados preliminares de produção de plasma e de geração e deteção de ondas de Langmuir na máquina de plasma quiescente (PQUI-II) do INPE. Os resultados obtidos com a máquina o perando com e sem o confinamento magnético superficial são promissores. Foi possível a valiar o típico comprimento das ondas de Langmuir excitadas e verificar o aumento na eficiência de ionização com a introdução de um campo magnético superficial.

## 1. INTRODUÇÃO

A máquina PQUI-II mostrada na Fig. 1, entrou em operação no início de 1990. Ela foi construída para realização de estudo experimental de ondas eletrônicas de plasma ou de Langmuir em um plasma espacialmente uniforme, constante no tempo, e com um baixo nível de ruído eletrostático [1]. Com estas características a PQUI-II torna-se ideal pa

ra o estudo da interação de ondas eletromag néticas com o plasma. Serão realizados estudos de processos não-lineares de interação onda-partícula, que ocorrem durante a conversão de ondas eletromagnéticas em modos de plasma (ondas acústico-iônicas e de Lang muir) [2]. O objetivo principal serão de determinar a relação entre o nível de saturação das ondas de Langmuir e as altas ener gias adquiridas pelas partículas durante estes processos. Estes estudos serão realizados em conjunto com o Laboratório de Física do Gás e dos Plasmas da Universidade de Paris-Sul em Orsay na França.

Os resultados destes estudos poderão ser de utilidade para os vários campos de aplicação da física dos plasmas. Para a área especial o estudo da interação de ondas de Langmuir como plasma simula em laboratório um dos principais mecanismos de aceleração de partículas em plasmas espaciais. A penetração de partículas carregadas na atmosfera através da anomalia magnética do Atlân-

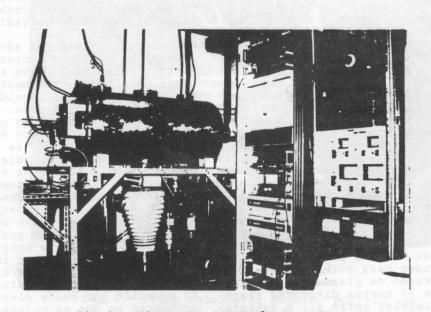


Fig.1 - Vista geral da máquina PQUI-II

tico Sul é um exemplo de aplicação destes estudos [3]. O desenvolvimento de novas concepções para aceleradores de partículas baseados na geração de campos elétricos in tensos no interior do plasma, via ondas de Langmuir, é um exemplo de aplicação na tec nologia de aceleradores de partículas compactos [4]. Os aceleradores de elétrons do tipo "Beat Wave" e "Surfatron" que utilizam este princípio já demonstraram a sua viabilidade científica [5]. Na fusão termo nuclear o estudo da conversão de ondas whistlers em ondas de Langmuir tem sua aplicação no aquecimento e na geração nãoindutiva de corrente em tokamaks com ondas eletro-ciclotrônicas [6].

Atualmente um variado número de fontes de ions, cujo tipo de descarga é o mesmo utilizado na PQUI-II, tem sido utilizado na indústria para tratamento de superfícies, no desenvolvimento de propulsores mais eficientes para controle de atitude de satélites e no aquecimento de plasmas termonucle ares [7]. Neste trabalho estão relatadas as características principais desta máquina, isto é os dados iniciais de produção de plasma com e sem confinamento superficial, e as primeiras medidas de excitação e deteção de ondas de Langmuir lineares.

#### 2. APARATO EXPERIMENTAL

A máquina de plasma quiescente PQUI-II formada por um recipiente de vácuo com dia metro interno = 0,6m e comprimento = 1,2m feita de aço inox não magnetizável tipo 304L. Ela foi construída e desenvolvida em um projeto conjunto do INPE com a indústria Cryometal S.A. O sistema de vácuo (Ed wards) é formado basicamente por uma bomba difusora (2000 1/s) com armadilha criogêni ca, e por uma bomba mecância (40m³/h) de dois estágios, como é mostrado na Fig. 1. A pressão de fundo de 8 x 10-8mbar ser atingida, com a câmara de vácuo operan do sem as estruturas internas, em um perio do de 48 horas de bombeamento.

Para aumentar a eficiência de ionização e produzir com maior densidade foi introduzi do na câmara um sistema de confinamento magnético superficial. Ele é formado por três estruturas de campos multidipolo magnéticos, isoladas eletricamente uma da outra e da câmara de vácuo, para formar três plasmas independentes (Fig. 2). Com este arranjo é possível controlar o potencial espacial de cada um dos plasmas. Com a introdução de gra des entre os plasmas será possível gerar fei xes de elétrons e de ions de baixa energia. Cada uma das estruturas é formada por um con junto de 32 barras de îmãs permanentes ferrita encapsuladas para evitar degaseifica ção durante a geração de plasma. As laterais são acrescidas de 10 barras dispostas transversalmente e paralelas entre si. A estrutura de campo multi-dipolo magnético mantém uma distância entre barras de 5,0 cm, capaz de produzir um campo superficial de 200 Gauss que confina principalmente os elétrons primários da descarga. Sistemas de grades polarizadas entre os plasmas poderão também ser utilizados para gerar ondas de Langmuir com feixes de elétrons.

O plasma quiescente é produzido a partir de uma descarga termoiônica continua com gás no bre (He, Ar ou Xe) que é introduzido na câma ra até uma pressão máxima de 5,0 x 10-4 mbar. A descarga mais eficiente é produzida por ca todos de chapa de níquel coberto por uma camada de óxido de bário (BaO). O níquel é indiretamente aquecido por filamentos de tungs tênio, isolados eletricamente do níquel um tubo de alumina, até uma temperatura 900º C. Alternativamente poderá ser utilizado um sistema mais simples, que consiste de um conjunto de catodos de tungstênio cobertos por óxido de bário, ligados em paralelo e diretamente aquecidos por correntes de até 2,0 A por filamento. Esta corrente os aquece por efeito Joule e um número significativo de elétrons da camada de BaO poderá ter ener qia superior à da função trabalho da camada. O efeito final é o da emissão de uma grande quantidade de elétrons, que é favorecida pe-lo vácuo existente na câmara, isto é pelo grande livre caminho médio existente para as partículas. A este processo dá-se o nome de emissão termoiônica.

Os cátodos são polarizados negativamente (Vd = -50 volts) com relação ao anodo formado pela estrutura de ímãs permanentes. Os elétrons acelerados colidem com os átomos neutros causando a ionização do gás no bre residual. A percentagem de ionização típica da PQUI-II é 0.01%. Na Fig. 3 vê-se o aspecto interno da câmara durante a descarga. Nota-se que a borda do plasma é delineada pelo campo multidipolo magnético.

Os plasmas quiescentes são ideais para uti lização ou teste de vários tipos de diagnóstico de plasma. Neste experimetno estaremos usando frequentemente sondas de Lang muir para medida de densidade e temperatura de elétrons do plasma. A sonda consiste em um eletrodo imerso no plasma que possui uma curva característica de corrente x vol tagem aplicada de onde se extraem vários parâmetros do plasma, tais como correntes de saturação de elétrons e ions, potencial flutuante, densidade e temperatura de elétrons. Para medir temperatura de íons usamos um analisador eletrostático de energia composto por duas grades e um coletor ions. A primeira grade que fica em contato com o plasma impede a entrada de elétrons, e a segunda seleciona os ions por energia. O potencial de plasma será medido com uma sonda emissiva, que consiste em um eletrodo aquecido que emite elétrons na proporção em que os coleta. A frequência e o comprimento das ondas de Langmuir pode-

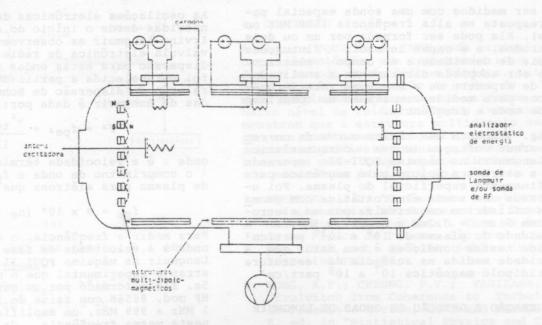


Fig.2 - Desenho esquemático da parte interna da PQUI-II, em corte longitudinal. Em destaque vêm-se as estruturas de campos multiplo magnéticos, o sistema elétrico e os diagnósticos de plasma.

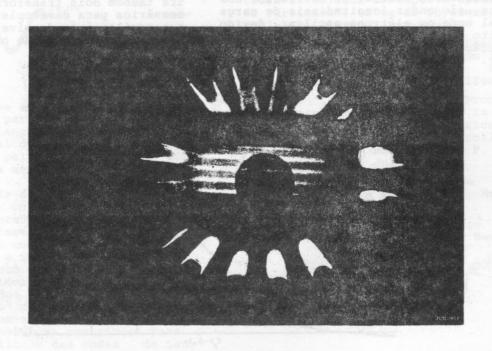


Fig.3 - Vista interna da máquina PQUI-II em operação, através da janela axial. O plasma produzido é de argônio a uma pressão de 4,0 x 10-4mbar.

rão ser medidos com uma sonda especial para resposta em alta frequência (100 MHz ou mais). Ela pode ser formada por um ou dois eletrodos, e é capaz de medir flutuações locais de densidade e de campo elétrico. Pode ser acoplada diretamente a analisadores de espectro ou a sistemas interferométricos para medida simultânea de comprimento de onda e frequência.

A Fig. 4 mostra uma típica curva de corrente versus voltagem (curva característica de Langmuir) na máquina PQUI-II operando com a estrutura multidipolo magnética para confinamento superficial do plasma. Foi utilizada uma sonda eletrostática com geome tria cilíndrica constituída por um eletrodo com Diam. = 0.2mm e Compr. = 5mm.). A densidade do plasma de 109 a 1010 part/cm³ medida nestas condições é bem maior que a densidade medida na ausência da estrutura multidipolo magnética 107 a 108 part/cm³.

# 3. GERAÇÃO E DETEÇÃO DE ONDAS DE LANGMUIR

Em um plasma livre de campos externos dois modos de propagação de ondas de plasma são possíveis. As ondas acústico-iônicas, com frequência menor que a frequência de plasma para ions, são oscilações em fase de elétrons e ions onde os elétrons contri buem com sua energia cinética e os com a massa. As ondas eletrônicas de plasma ou de Langmuir, com frequência maior que a frequência natural de oscilação dos elétrons, são ondas longitudinais de carga espacial onde os elétrons oscilam devido ao efeito combinado de sua própria inércia, com a ação de campos elétricos restauradores [8].

As oscilações eletrônicas de plasma são conhecidas desde o início do século, quando Irving Langmuir as observou em 1926 em uma válvula eletrônica de rádio. A relação de dispersão para estas ondas no entanto, só foi estabelecida a partir dos anos 50. A relação de dispersão de Bohm-Gross para on das de Langmuir é dada por:

$$f^2 = f_{pe^2} + \frac{v^2 term}{\lambda^2}$$

onde  $\nu$  é a velocidade térmica dos elétrons,  $\lambda$  o comprimetno de onda e fpe a freqüência de plasma para elétrons que é dada por:

$$f_{pe} = 9 \times 10^3 [n_e (cm^{-3})]^{1/2}$$

Para medir a frequência, o comprimento onda e a velocidade de fase das ondas Langmuir na máquina PQUI II utilizamos arranjo experimental que é mostrado na Fig. 5a. Ele é formado por um gerador de sinais HP mod. 8656B com faixa de fregüência 1 MHz a 999 MHz, um amplificador que opera nesta mesma frequência da Amplifier Re search mod. 5W1000 de 5W de potência, antena do tipo grade em forma de disco com diâm. = 10 cm, uma sonda de Langmuir para altas frequências e um osciloscópio Tektro nics de 400 MHz mod. 7844. Em conjunto com o osciloscópio foi usado também um analisa dor de espectro mod. 7L13 também da Tektro nics, para medida direta da fregüência na tural de oscilação do plasma. O esquema mostra também dois transformadores de pulso necessários para desacoplar o gerador de sinal e o osciloscópio do nível DC associado potencial flutuante do plasma.

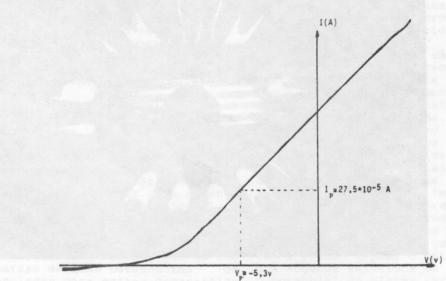
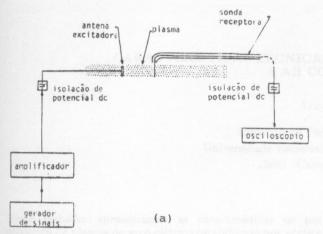


Fig. 4 - Curva característica de uma sonda de Langmuir na PQUI II operando com confinamento magnético superficial. P=3,6 x 10-4mbar, Vd=3; Volts, Id=1,0 A, ne=109 part/cm, Te=3,0eV.



SINAL GERADO: f=295 MHz; Ampl.=+1,5 dBm PARÂMETROS DO PLASMA:

$$I_{d}=0.2A$$
;  $V_{d}=60v$ ;  $P_{Ar}=4.8*10^{-4}$  mbar  $P_{e}=10^{8}$  part./cm<sup>3</sup>;  $P_{e}=5.0$  eV

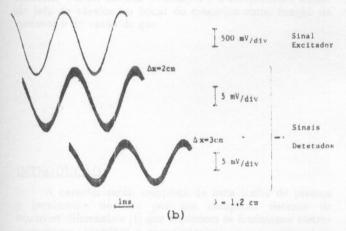


Fig.5 - (a) Esquema do aparato experimental utilizado para geração e deteção de ondas de Langmuir. (b) Comparação en tre o sinal de excitação e os sinais detetados pela sonda para duas distâncias da antena.

Na Fig.5b os sinais de excitação e de recepção são mostrados. Os dois sinais detetados pela sonda em diferentes posições mostram uma diferença de fase e uma diferença na amplitude. De acordo com a relação de dispersão de Bohm-Gross a velocidade de fase da on da de Langmuir neste plasma é de 3 x 108cm/s, bem próxima da velocidade que pode ser estimada diretamente dos sinais de sonda que  $\stackrel{\circ}{\text{e}}$  da ordem de 4 x  $10^8$  cm/s. Quanto ao amorteci mento da onda, sabe-se que colisões de elétrons com átomos neutrons contribuem para o decréscimo da amplitude das ondas de Langmuir. É necessário também considerar a possi bilidade das ondas serem amortecidas por efeitos não colisionais como é o caso do amor tecimento de Landau ocasionado pela interação ressonante entre as ondas e as particu las.

## 4. CONCLUSÃO

A máquina PQUI II do INPE pode produzir descarga termoiônica com características adequa das ao estudo de fenômenos básicos, tais como a geração e a deteção de ondas de Langmuir em plasma espacialmente uniforme e com baixo nível de ruído. Os dados iniciais demonstram que a estrutura multidipolo magnética para confinamento superficial do plasma aumenta significativamente a densidade do plasma ao mesmo tempo em que diminui a potên cia necessária para gerá-lo.

- 1. FERREIRA, J.L. "Fenômenos Acústico-Iônicos Lineares e Não-Lineares em Descargas Multi-Dipolo Magnéticas". Tese de Doutora do em Física de Plasma. São José dos Campos, INPE, set. de 1986 publ. int. n. INPE-4100-TDL/257.
- WONG, A.Y.; CHEUNG, P.Y.; TANIKAWA, T.
  "Evolution from Coherence to Turbulence
  in Plasmas". Horton, C.W. and Reich, L.
  E. ed. in "Statistical Physics and Chaos
  in Fusion Plasmas". New York, John Wiley,
  1984.
- PINTO JR., O. and GONZALEZ, W.D. "Energe tic Electron Precipitation at The South Atlantic Magnetic Anomaly: a review". Journal of Atmospheric and Terretrial Physics, 51(5):351-365, 1989.
- 4. HEUSH, B.; MATHIEUSSENT, G. "Accelerateurs et Noveaux Concepts d'acceleration de Particles". Revue de Physique, 23: 1417-1421, 1988.
- 5. DOMIER, C.W.; NISHIDA, Y.; LUHMANN JR., N.C. "Control of Pump Depletion in vp x B Acceleration of Electrons". Physical Review Letters, 63(17), 1803-1806, 1989.
- 6. SHIBATA, C.S.; MONTES, A. Propagation and Damping of Whistler waves in Tokamaks". Proc. of the Latin American Workshop on Plasma Phys. and Controlled Ther monuclear Fusion Research, 3, P. 71-22, Santiago, Chile, July 1988.
- FORRESTER, A.T. In "Large Ion Beams", John Wiley & Sons Publication, New York, 1987.
- CHEN, F.F. In "Introduction to Plasma Physics", chp. 4 Plenum Press New York, 1974.