

CARACTERIZAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE PLASMA QUIESCENTE ACOPLADA A UMA CÂMARA DE PLASMA R.F.

Marcos Massi*, Homero Santiago Maciel, José Celso Thomaz Júnior e José Pantuso Sudanc

Laboratório de Física de Plasmas
I.T.A. - C.T.A.

12225 - São José dos Campos - SP - BRASIL

RESUMO:

O trabalho tem o objetivo de caracterizar uma máquina de plasma constituída por duas câmaras, sendo que em uma câmara o plasma é produzido por uma descarga termoiônica D.C. com confinamento magnético superficial (plasma quiescente) e na outra o plasma é produzido por uma descarga R.F.. Através de sondas de Langmuir foram levantadas curvas características (corrente x tensão) de forma a obter os parâmetros básicos do plasma: temperatura de elétrons, densidade de elétrons, potencial de plasma e potencial flutuante. O comportamento destes parâmetros com a pressão de trabalho, posição da sonda no interior da câmara e potência RF é investigado e interpretações qualitativas são apresentadas com base nos mecanismos de descarga DC e RF.

1. INTRODUÇÃO

Uma descarga elétrica é a forma mais simples de se obter um plasma num laboratório. A descarga DC é constituída por dois eletrodos entre os quais introduzimos um gás à baixa pressão. Aplicando-se uma d.d.p. entre os eletrodos, os elétrons livres existentes no volume do gás ou produzidos por emissão termoiônica, são acelerados em direção ao anodo produzindo pares elétron-íon através de colisões ionizantes até atingir-se a ruptura do gás (breakdown). Em condições apropriadas de pressão de gás, corrente e voltagem, uma descarga auto-sustentada se estabelece [1].

Em nosso trabalho apresentamos a caracterização de um sistema misto (plasma DC - plasma RF) com o objetivo de realizar pesquisa básica sobre os processos envolvidos nas descargas elétricas DC e RF. O estudo básico apresentado é fundamental para o entendimento do sistema e otimização do mesmo para possíveis aplicações na área de processos assistidos por plasmas [2].

2. DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

O experimento é constituído por uma câmara de aço-inox (com dimensões: raio $R=7,5\text{cm}$ e

* Aluno da Fundação Valeparaibana de Ensino - São José dos Campos - SP

comprimento $L=30\text{cm}$) acoplada a uma segunda câmara de vidro (com dimensões semelhantes), Fig.1. Através de bombas mecânica e difusora atingimos uma pressão de fundo de 10^{-7} torr . Introduz-se argônio à diversas pressões.

Na primeira câmara, elétrons são injetados através de um conjunto de filamentos de tungstênio aquecidos. Aplica-se uma d.d.p. entre estes filamentos e as paredes da câmara de forma a produzir uma descarga termoiônica DC. A emissão de elétrons através dos filamentos permite ruptura da descarga com tensões bem menores entre os eletrodos. A câmara é revestida por um conjunto de ímãs de tal forma que um campo magnético superficial da ordem de 700 gauss é obtido propiciando o confinamento do plasma e minimizando assim perdas de partículas carregadas para as paredes.

Na segunda câmara uma fonte RF com frequência de 13,56 MHz é acoplada à uma bobina enrolada em torno da câmara de vidro (pyrex). O sinal RF é amplificado e aplicado à bobina através de um casador de impedâncias. Um wattímetro de linha é utilizado para monitorar a potência incidente e refletida no sistema [3].

Foi utilizada uma sonda eletrostática cilíndrica (sonda de Langmuir) de tungstênio (com dimensões $L = 5\text{ mm}$ e $r = 0,05\text{ mm}$) para obtermos os parâmetros básicos do plasma. Utilizamos a técnica usual para determinação de parâmetros do plasma a partir da curva característica da sonda. No caso do plasma RF a curva característica é distorcida devido à flutuação de RF entre o plasma e a sonda. Para minimizar esta distorção utilizamos a técnica sugerida por Gagné e Cantin [4] que consiste em inserir no circuito da sonda uma impedância alta na frequência de RF. Assim, a sonda acompanhará a oscilação do plasma e a curva característica obtida será representativa dos valores médios (DC) dos parâmetros do plasma.

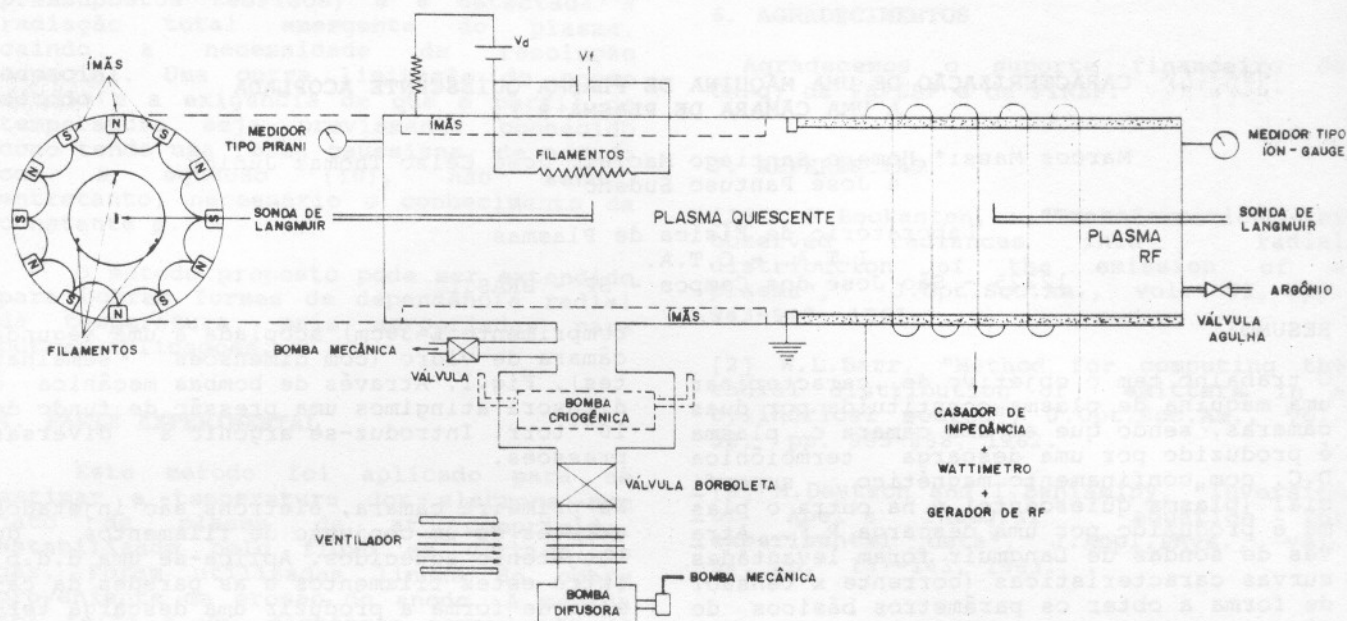


Fig. 1 - Aparato Experimental

No modelo ilustrado na figura 2 observamos que a tensão de RF do plasma, V_p , é dividida em uma parcela sobre Z_s (impedância da bainha) e outra parcela sobre Z_c (impedância de compensação). Desejamos, portanto, maximizar Z_c em relação a Z_s . Com esse objetivo utilizamos uma bobina de $320\mu H$ conectada o mais próximo possível da sonda. Assim minimizamos a capacitância parasita Ca que atua no sentido de limitar o valor $|Z_c|$.

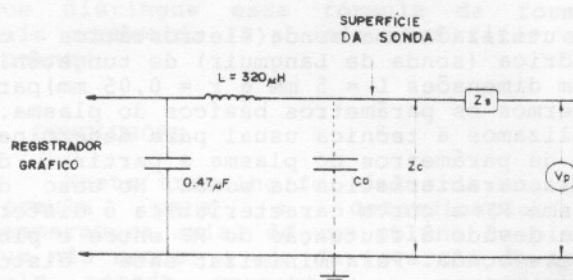


Fig. 2 - Circuito de Compensação utilizado na sonda RF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando o circuito de sonda obtivemos curvas características [5], que nos permitiram determinar a densidade de elétrons, temperatura de elétrons, potencial do plasma e potencial flutuante. Estes parâ-

metros foram obtidos para diversos valores de corrente de filamento, pressão de argônio, potencial da descarga e potência elétrica. Nas figuras 3 e 4 mostramos a variação da densidade e temperatura de elétrons com a pressão, na descarga DC. Estes resultados foram obtidos mantendo-se o potencial da descarga constante e com a sonda localizada no centro da câmara.

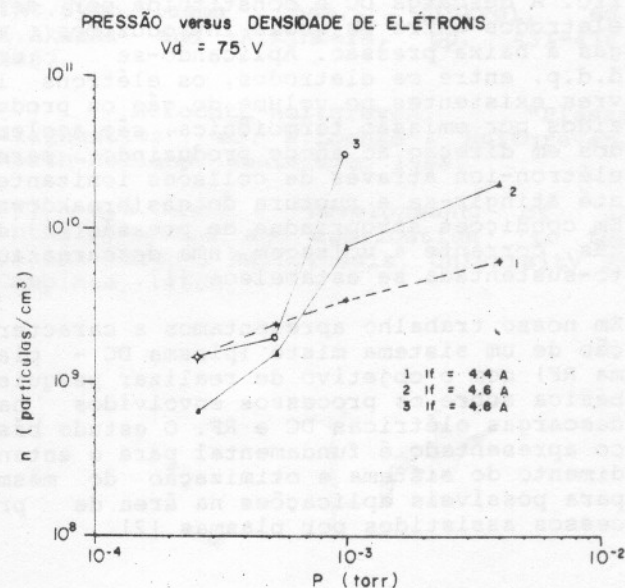


Fig. 3 - Comportamento da densidade de elétrons com a pressão.

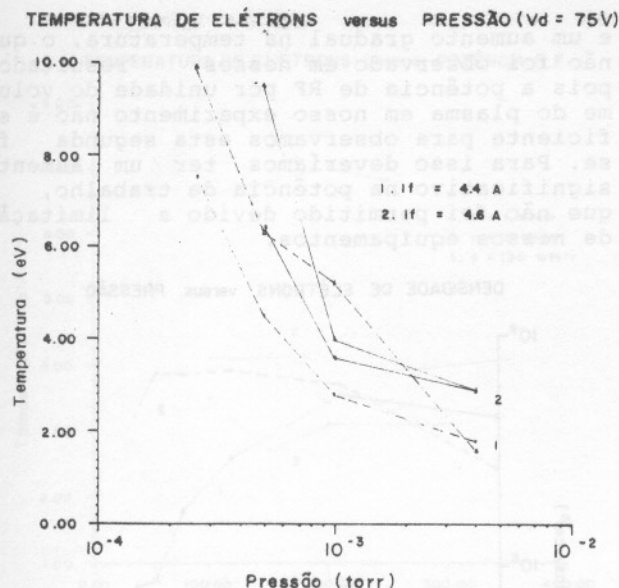


Fig. 4 - Comportamento da temperatura com a pressão.

Observamos que, com o aumento da pressão, há um aumento na densidade de elétrons no interior da descarga. Para baixas pressões os elétrons têm um caminho livre médio muito longo (aproximadamente 30 cm) e, sendo este caminho livre médio da ordem das dimensões da câmara, os elétrons escapam em direção à parede sem causar ionização. Para altas pressões, o caminho livre médio dos elétrons torna-se pequeno em comparação com as dimensões da descarga e portanto aumenta a taxa de ionização e consequentemente a densidade de elétrons no interior da descarga. De forma qualitativa observamos este comportamento na Fig.3.

A temperatura de elétrons, ao contrário, diminui com o aumento da pressão. Observamos duas temperaturas de elétrons distintas (duas populações de elétrons), mostrando desta forma que a função de distribuição de elétrons não é maxwelliana. Para baixas pressões observamos uma termalização, com a temperatura de elétrons permanecendo em torno de 2,0 eV.

Na realidade, a função de distribuição é uma superposição de duas maxwellianas. Devemos então fazer uma distinção entre elétrons primários, quentes e frios. Os elétrons primários possuem energia eV_D onde V_D é o potencial da descarga, os elétrons quentes são aqueles produzidos pela ionização e os elétrons frios são aqueles devolvidos pelo campo magnético superficial à descarga [6]. As curvas características obtidas em baixa pressão permitiram estimar o valor da densidade de elétrons primários da descarga como aproximadamente

$5,0 \times 10^8$ part/cm³. Aumentando a corrente de filamento observamos um aumento na densidade e temperatura de elétrons, como mostra as figuras 3 e 4.

Nas figuras 5 e 6 apresentamos a variação do potencial flutuante e da temperatura de elétrons com a distância radial. Uma variação significativa ocorre somente muito próximo à parede interna, indicando uma boa uniformidade do plasma com confinamento magnético.

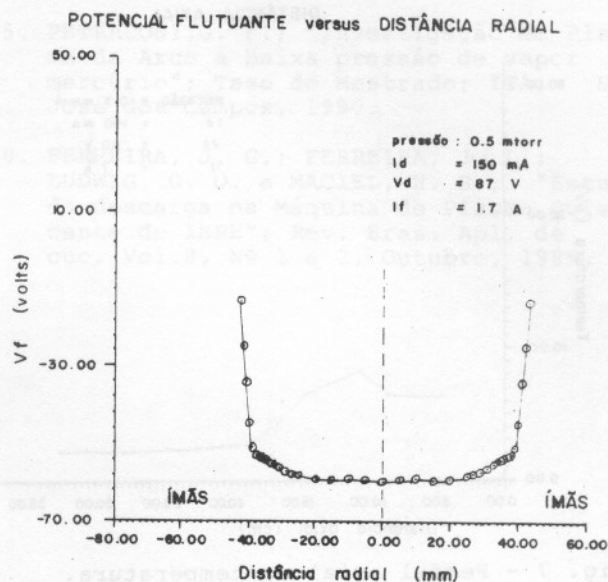


Fig. 5 - Perfil radial do potencial.

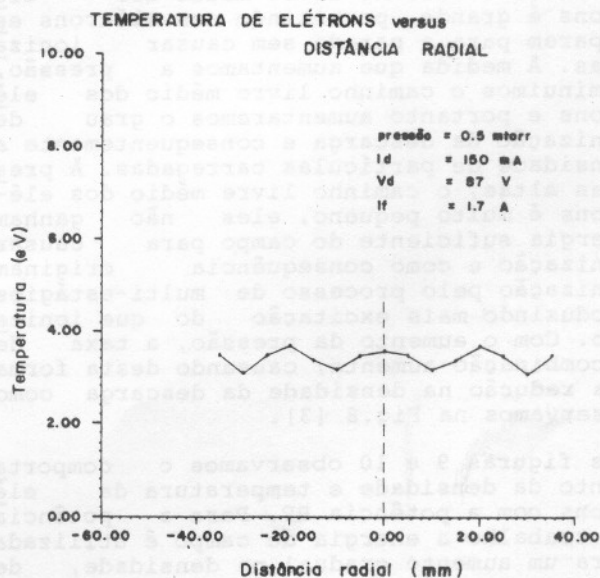


Fig. 6 - Perfil radial de temperatura.

Na figura 7 mostramos o comportamento da temperatura de elétrons com a distância axial. Observamos que na região fora dos filamentos a temperatura de elétrons apresenta-se bastante uniforme com um valor próximo a 2,0 eV. Enquanto que na região próxima aos filamentos há um aumento na temperatura, provavelmente ocasionado pela concentração de elétrons não termalizados ao redor dos filamentos.

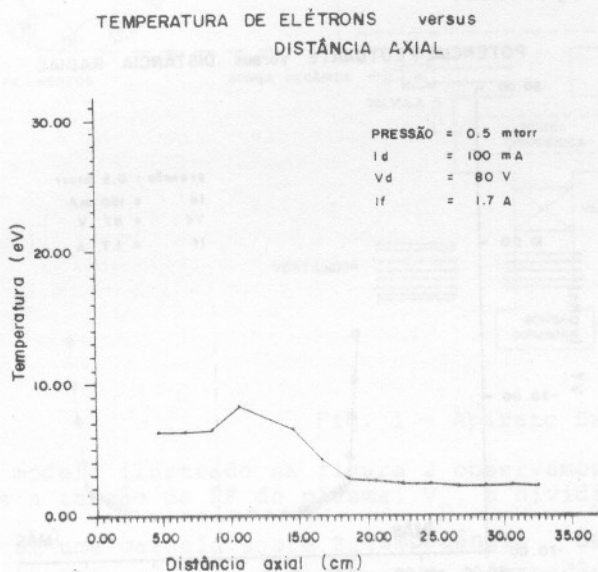


Fig. 7 - Perfil axial da temperatura.

Na figura 8 apresentamos o comportamento na descarga RF da densidade de elétrons com a pressão. Observamos que em baixas pressões o caminho livre médio dos elétrons é grande, permitindo aos elétrons escapar para a parede sem causar ionizações. À medida que aumentamos a pressão, diminuímos o caminho livre médio dos elétrons e portanto aumentaremos o grau de ionização da descarga e consequentemente a densidade de partículas carregadas. À pressões altas, o caminho livre médio dos elétrons é muito pequeno, eles não ganham energia suficiente do campo para causar ionização e como consequência originam ionização pelo processo de multi-estágios produzindo mais excitação do que ionização. Com o aumento da pressão, a taxa de recombinação aumenta, causando desta forma uma redução na densidade da descarga como observamos na Fig.8 [3].

Nas figuras 9 e 10 observamos o comportamento da densidade e temperatura de elétrons com a potência RF. Para a potência de trabalho a energia do campo é utilizada para um aumento gradual na densidade, de forma que a temperatura de elétrons sofre pouca variação, como observado. Dentro de uma segunda etapa [3] deveríamos observar uma fase de aquecimento do plasma caracterizado por um pequeno aumento na densidade

e um aumento gradual na temperatura, o que não foi observado em nossos resultados pois a potência de RF por unidade de volume do plasma em nosso experimento não é suficiente para observarmos esta segunda fase. Para isso deveríamos ter um aumento significativo na potência de trabalho, o que não foi permitido devido a limitação de nossos equipamentos.

DENSIDADE DE ELÉTRONS versus PRESSÃO

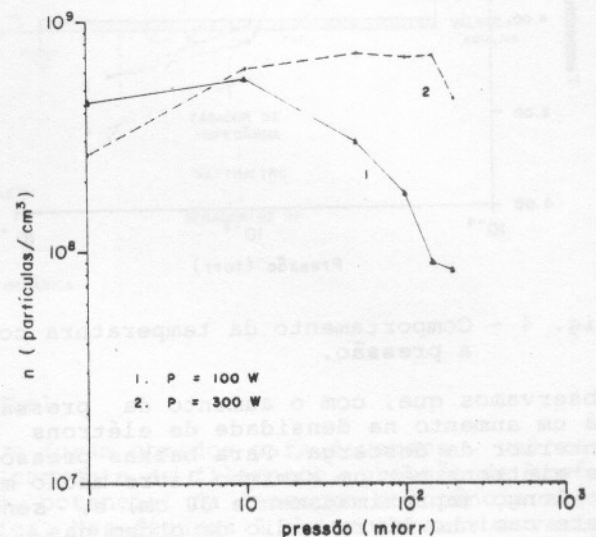


Fig. 8 - Comportamento da densidade com a pressão na descarga RF.

DENSIDADE DE ELÉTRONS versus POTÊNCIA R.F.

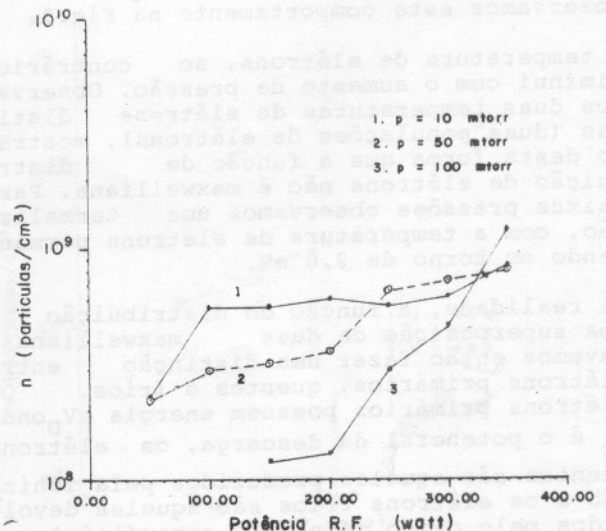


Fig. 9 - Comportamento da densidade com a potência RF.

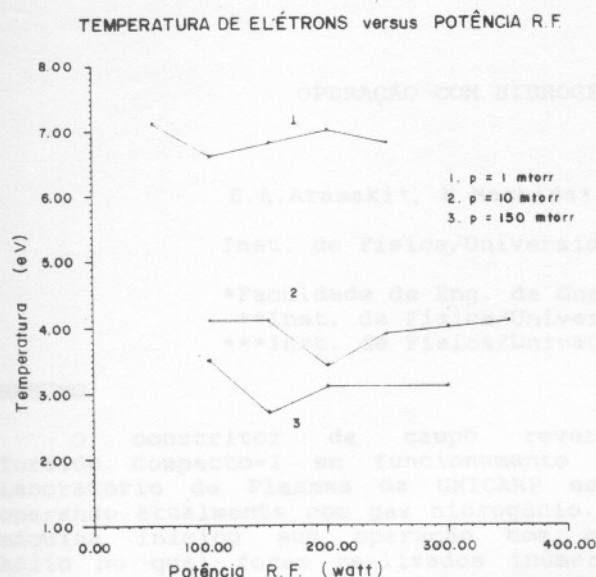


Fig. 10 - Comportamento da temperatura com a potência R.F.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos estão qualitativamente de acordo com experiências realizadas em câmaras semelhantes [3] e [6], ressaltando a importância da técnica de sonda como ferramenta simples e eficiente na determinação dos parâmetros básicos do plasma, e consequentemente na sua caracterização e estudo.

Na operação da descarga RF, o plasma difundiu-se para o interior da câmara com confinamento magnético, exibindo no seu interior uma luminosidade bastante intensa. Este plasma remanescente da descarga RF, confinado magneticamente e sem elétrons primários emitidos pelo filamento aquecido será caracterizado como continuação do presente trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos à Srta Rosemary Rodrigues de Souza pelos serviços datilográficos, e ao Sr. Márcio Antonio Sulzbach pela confecção dos desenhos.

6. BIBLIOGRAFIA

1. NASSER, E.; "Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics"; J. Willey & Sons, New York, 1971.

2. CHAPMAN, B.; "Glow Discharge Processes"; J. Willey & Sons, 1980.
3. AMORIM, J. F.; "Estudo Teórico e Experimental sobre uma Descarga RF acoplada indutivamente"; Tese de Mestrado; ITA; São José dos Campos, 1989.
4. GAGNÉ, R.R. e CANTIN, A.; "Investigation of an RF Plasma with symmetrical and asymmetrical Electrostatic Probes"; J. Appl. Phys., Vol.43, Nº 6, June, 1972.
5. PETRACONI, G. F.; "Investigação em Plasma de Arcc a baixa pressão de vapor de mercúrio"; Tese de Mestrado; ITA; São José dos Campos, 1990.
6. FERREIRA, J. G.; FERREIRA, J. L.; LUDWIG, G. O. e MACIEL, H. S.; "Estudo da descarga na Máquina de Plasma Quiescente do INPE"; Rev. Bras. Apl. de Vácuo, Vol.8, Nº 1 e 2, Outubro, 1989.