

CONDICIONAMENTO DO TOKAMAK TBR-1 POR PLASMA
GERADO POR MICROONDAS

J.I. Elizondo, I.C. Nascimento
Instituto de Física - USP
Caixa Postal 20.516
01498 - São Paulo - SP

RESUMO: Os sistemas de condicionamento da câmara de vácuo desenvolvidos para tokamaks, têm como objetivo diminuir a densidade de carbono e oxigênio na superfície da parede. No Tokamak TBR-1 foi implementado o sistema CPM (Condicionamento por Plasma Gerado por Microondas). Os resultados, avaliados com um analisador de gás residual, mostram a eficiência do processo de limpeza.

Limpeza em Tokamaks, Plasma Gerado por Microondas, Câmaras de Vácuo.

1. INTRODUÇÃO

Em plasmas de hidrogênio são considerados impurezas átomos com $Z \neq 1$, que por diversos mecanismos passam a formar parte do plasma. A presença de impurezas tem efeito deletéreo sobre a temperatura e a estabilidade do plasma, e acima de certos níveis de concentração pode tornar impossível a operação dos reatores de fusão (1,2).

Em máquinas do tipo tokamak a contaminação decorre da interação plasma-parede durante a descarga. Ligado a este problema foram desenvolvidos diversos procedimentos de condicionamento da parede, cujo objetivo é minimizar a probabilidade de emissão de impurezas durante o disparo tokamak.

O sistema CPM (Condicionamento por Plasma Gerado por Microondas), pesquisado inicialmente pelo Grupo de Plasma da Universidade de Nagoya (3,4,5), foi implementado também no tokamak TBR-1 do Instituto de Física da USP (1). O plasma de

condicionamento é de baixa temperatura e pequeno grau de ionização: $n_e = 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 6 \text{ eV}$, $n_{\text{H}_2} = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $\alpha < 1\%$. Nestas condições é gerado um fluxo de átomos neutros de hidrogênio de baixa energia na reação $e^- + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{H} + e^-$, que bombardeia a parede, combinando-se com o oxigênio e carbono das superfícies do vaso (aço 316L) para formar H_2O , CH_4 , etc. Estes compostos, tendo uma energia de ligação com a rede relativamente pequena, são facilmente liberados pela superfície e bombeados pelo sistema de vácuo (fig. 1).

2. GERAÇÃO DO PLASMA DE CONDICIONAMENTO

O plasma de limpeza é gerado no interior da câmara pela interação de um feixe de microondas com elétrons livres, na presença de um campo magnético toroidal suficientemente intenso, produzido por espiras externas ao vaso.

O feixe de microondas, com $f = 2,45 \text{ GHz}$, $P = 800 \text{ W}$ (contínuo), é gerado por uma magnetron 2M 172J, facilmente disponível no mercado nacional. A transmissão é feita no modo TE_{10} num guia de onda de seção retangular, e o feixe é injetado linearmente polarizado, com o campo elétrico paralelo ao campo magnético toroidal (modo ordinário). O arranjo experimental é mostrado na figura 2.

Nestas condições aparecem 2 regiões de ressonância (1, 6, 7) para $r = r_{\text{res}}$ (ressonância ciclotrônica) e para $r = r_{\text{Hs}}$ (ressonância híbrida superior), onde r é a distância horizontal medida a partir do centro da seção transversal da câmara toroidal. A figura 3 mostra algumas medidas de n_e e T_e obtidas com uma sonda eletrostática dupla. A linha cheia é apenas uma interpolação entre os pontos experimentais, que permite caracterizar qualitativamente a forma dos perfis. O fluxo de átomos neutros de hidrogênio sobre a parede, calculado a partir destes perfis, é da ordem de $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

3. MODELO DO PROCESSO DE CONDICIONAMENTO

Sendo o oxigênio o principal contaminante em diversos tokamaks (2, 8), foi desenvolvido um modelo simples que fornece indicações úteis para maximizar o bombeamento

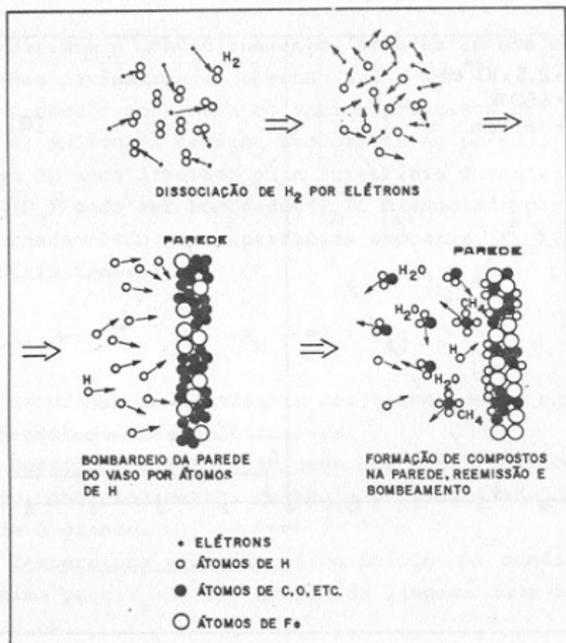
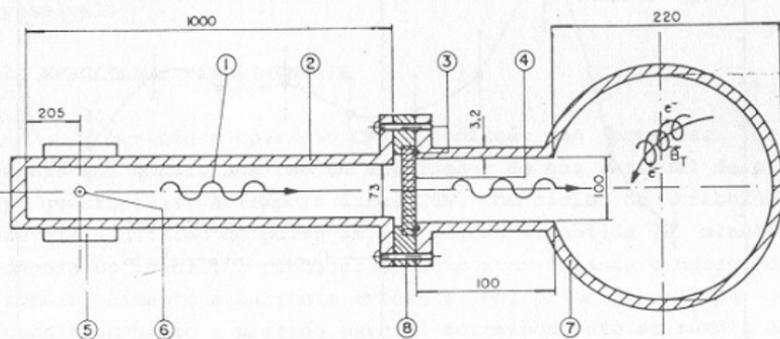


Fig. 1 - Condicionamento da Parede por Plasma de Hidrogênio



- ① - MICROONDAS
- ② - GUIA DE ONDAS
- ③ - ANEL DE VEDAÇÃO DE VÁCUO
- ④ - VIDRO PYREX
- ⑤ - MAGNETRON
- ⑥ - ANTENA DE MICROONDAS
- ⑦ - CÂMARA DE VÁCUO

Fig. 2 - Sistema de Injeção de Microondas

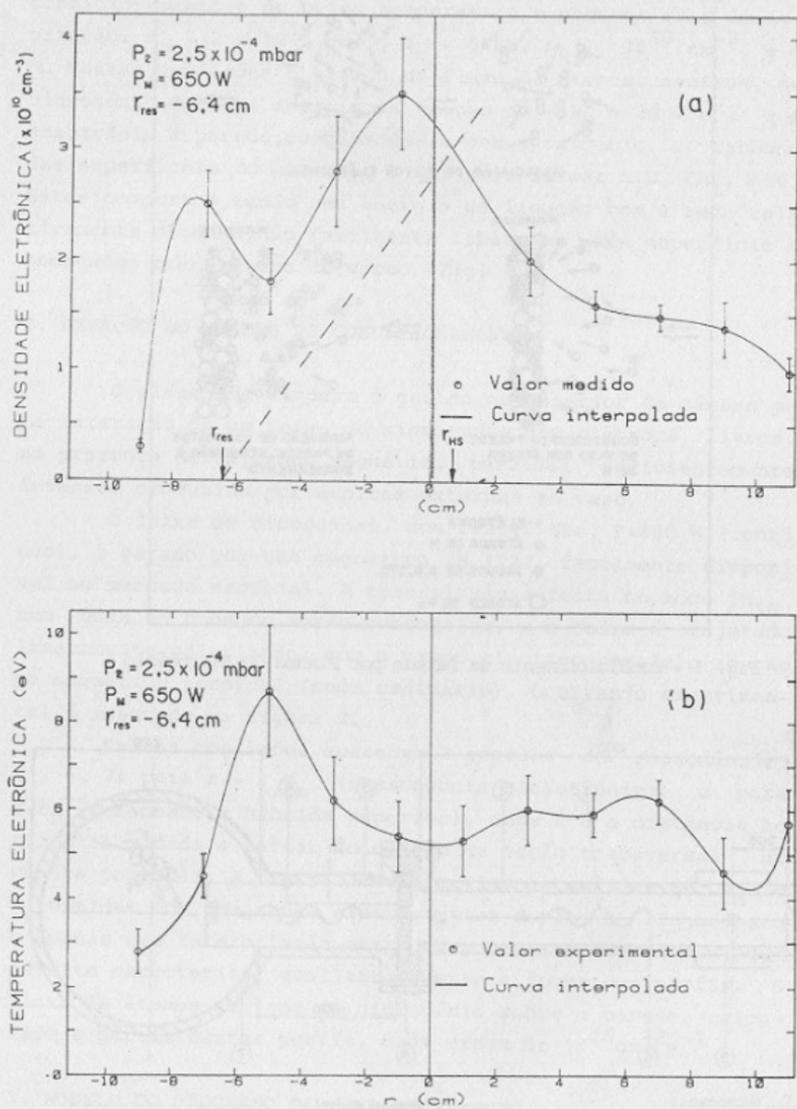


Fig. 3 - Perfil de densidade (a) e temperatura eletrônica (b) obtido em CPM com uma sonda eletrostática dupla. O ponto $r=0$ corresponde ao centro da seção transversal do vaso.

da água durante o condicionamento, através de uma escolha criteriosa dos parâmetros do plasma (1,4).

O modelo considera os vários processos que podem ocorrer com as moléculas de água produzidas na parede: o fluxo de moléculas de água liberado pela superfície durante o condicionamento (F_e) pode ser bombeado (F_b), dissociado por elétrons (F_d), ou readsorvido nas superfícies expostas (F_{ad}). No estado estacionário tem-se:

$$F_e = F_b + F_d + F_{ad} \quad (1)$$

Estudando a dependência dos termos desta equação com os parâmetros do plasma conclui-se:

Densidade eletrônica: deve ser alta, principalmente no fim do condicionamento, quando a probabilidade de adsorção na parede é grande.

Temperatura eletrônica: no início do condicionamento F_b é máximo para $T_e = 1$ eV. No fim da limpeza deve ser da ordem de 20 eV.

Pressão de hidrogênio: F_b é linear com P_{H_2} , desde que os outros parâmetros sejam mantidos.

Velocidade de bombeamento: deve ser tão grande quanto possível.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Durante a operação CPM a evolução das pressões parciais foi monitorada com um analisador de gás residual de tipo quadrupolar. A limpeza durou 20h, com ciclo de trabalho de 11% e duração do pulso 8s. Na figura 4, obtida 75 minutos depois do início, a produção de compostos durante o pulso de condicionamento é bastante evidente. Nos primeiros pulsos de condicionamento a pressão parcial correspondente ao número de massa 18 (H_2O) e 28 ($N_2-CO-C_2H_4$) é duas ordens de grandeza maior do que no vácuo base.

Espera-se que a pressão parcial dos elementos formados diminua com o tempo, refletindo o decréscimo da densidade superficial de oxigênio e carbono. No caso da água a dependência com o tempo é do tipo $t^{-0,4}$ (fig. 5). A partir desta cur-

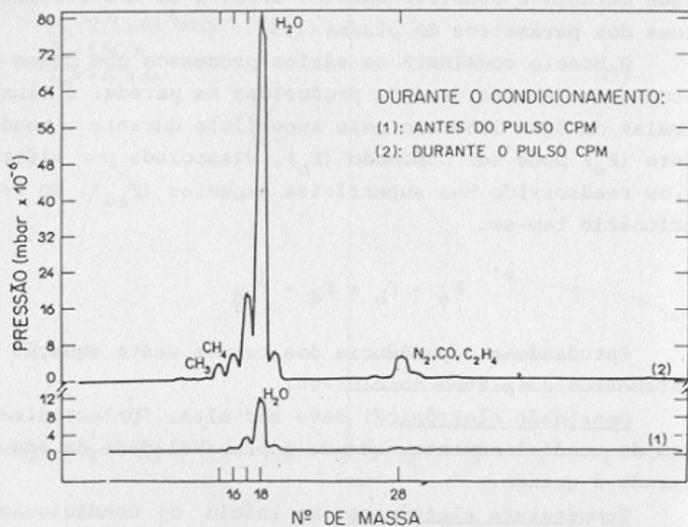


Fig. 4 - Espectro de pressões parciais antes e durante o pulso CPM ($t = 75$ min).

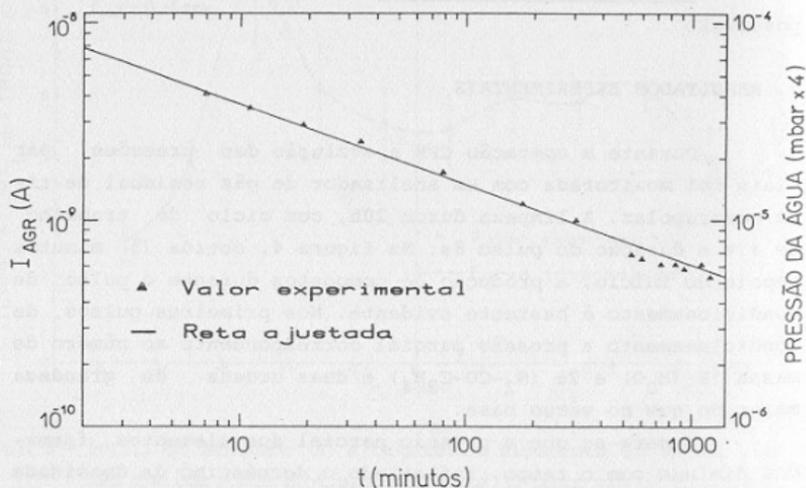


Fig. 5 - Pressão da água durante o pulso em CPM.

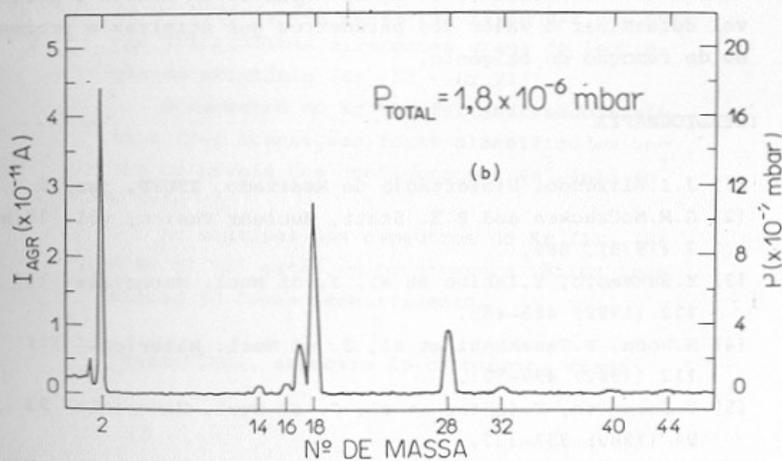
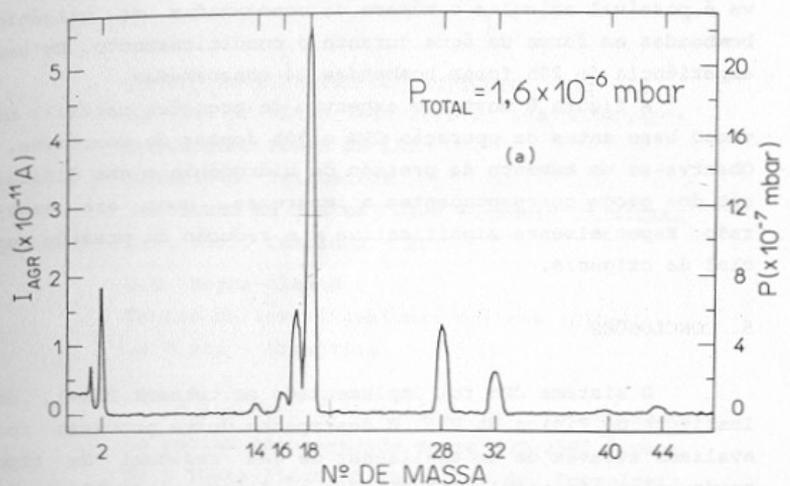


Fig. 6 - Espectro de pressões parciais no vácuo base antes do CPM (a) e 10 h depois de concluído (b).

va é possível calcular o número de monocamadas de oxigênio bombeadas em forma de água durante o condicionamento. Em uma experiência de 20h foram bombeadas 14 monocamadas.

A figura 6 mostra o espectro de pressões parciais no vácuo base antes da operação CPM e 10h depois de concluída. Observa-se um aumento da pressão de hidrogênio e uma diminuição dos picos correspondentes a impurezas, como era esperado. Especialmente significativa é a redução da pressão parcial de oxigênio.

5. CONCLUSÕES

O sistema CPM foi implementado no tokamak TBR-1, do Instituto de Física da USP. O desempenho deste processo foi avaliado através de um analisador de gás residual de tipo quadrupolar. Os resultados obtidos confirmam a eficiência do CPM na remoção de oxigênio da parede via formação de água. Foi usado um modelo simples do processo de limpeza, visando maximizar o bombeamento da água. A partir do modelo é possível determinar o valor dos parâmetros que otimizam o processo de remoção do oxigênio.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J.I.Elizondo, Dissertação de Mestrado, IFUSP, jun/86.
- (2) G.M.McCracken and P.E. Stott, Nuclear Fusion, vol. 19, nº 7 (1979), 889.
- (3) Y.Sakamoto, Y.Ishibe et al, J. of Nucl. Materials 111 & 112 (1982) 485-488.
- (4) N.Noda, S.Tanahashi et al, J. of Nucl. Materials 111 & 112 (1982) 498-501.
- (5) Y.Sakamoto, Y.Ishibe et al, J. of Nucl. Materials 93 & 94 (1980) 333-337.
- (6) R.A. Cairns and C.N. Lashmore-Davies, Phys. Fluids 25(9) (1982), 1605.
- (7) K. Ohkubo, K. Kawahata et al, Nagoya Institute of Plasma Physics, IPPJ-554, (1982).
- (8) L.Oren, R.J. Taylor, Nuclear Fusion 17, 6 (1977), 1143.