

CONDICIONAMENTO DE CÂMARAS DE VÁCUO POR PLASMA DE RF

J.I. Elizondo, I.C. Nascimento

Instituto de Física - USP

Caixa Postal 20.516

01498 - São Paulo - SP

RESUMO: Nestes últimos anos tem se usado com sucesso em máquinas experimentais de pesquisa em plasma, as quais trabalham com hidrogênio ou deutério, um novo sistema de condicionamento da câmara de vácuo. Consiste basicamente na geração de um plasma de hidrogênio por microondas com temperatura eletrônica baixa ($T_e \sim 5\text{eV}$) e pequeno grau de ionização ($\alpha \sim 1\%$). Os íons e os átomos neutros gerados na reação $e^- + H_2 \rightarrow H + H + e^-$, bombardeiam as paredes da câmara, combinando-se com os átomos de impureza presentes na superfície e gerando diversos compostos: H_2O , CO , CH_4 , CO_2 , etc. O sistema de vácuo, que funciona continuamente, retira esses compostos. Desta maneira pode-se diminuir a degaseificação das impurezas.

No TBR (Tokamak Brasileiro) foi construído um sistema de microondas de baixo custo, usando-se uma válvula tipo magnetron ($f = 2,45\text{ GHz}$, $P = 800\text{ W}$). As pressões parciais dos gases, antes, durante e depois do condicionamento, foram monitoradas mostrando a eficiência do processo.

Condicionamento, Microondas, Plasma

1 - INTRODUÇÃO

Nestes últimos anos os pesquisadores que trabalham em plasmas de H_2 confinados magneticamente, tem estudado intensivamente o problema das impurezas⁽¹⁾. No regime de alto vácuo em que operam as máquinas de pesquisa, átomos de impurezas desadsorvidos espontaneamente da parede ou arrancados dela na interação plasma-parede contaminam o plasma. Os principais contaminantes, O e C, esfriam o plasma irradiando grande parte de sua energia, podendo também induzir instabilidades no confinamento magnético⁽²⁾.

As técnicas usuais para prevenir ou diminuir a contaminação das paredes de sistemas de alto vácuo - eletropolimento, tratamentos químicos, "baking", etc., têm se mostrado insuficientes para garantir o teor de pureza requerido no plasma. Sem dispensar estas técnicas, novos métodos foram desenvolvidos para otimizar o condicionamento das câmaras de vácuo:

- "Gettering": deposição de uma fina camada de titânio, como nas bombas de sublimação.
- Condicionamento por descarga em H_2
 - . Em regime "glow"
 - . Em regime de pressão baixa
 - * com plasmas gerados por audio-frequência (Taylor)
 - * com plasmas gerados por microondas (Grupo de Nagoya)

O uso de plasmas de RF para condicionamento de câmaras de vácuo, iniciado pelo Grupo de Nagoya (Japão)⁽³⁾, é bastante promissor e está sendo estudado também no Tokamak TBR do Instituto de Física da USP.

2 - GERAÇÃO DE PLASMA POR MICROONDAS

O plasma de condicionamento no Tokamak é gerado por ressonância eletron-ciclotrônica. Um campo magnético de 875 G criado por bobinas externas ao vaso, obriga os elétrons livres que houver no gás a girar em torno das linhas de campo com $f=2,45$ GHz. Simultaneamente é injetado no va-

so um feixe de microondas da mesma frequência, que transfere a sua energia para os elétrons. Estes por sua vez colidem com as moléculas de H_2 , gerando átomos neutros e pares $H^+ + e^-$, formando um plasma de baixa temperatura ($\sim 7\text{eV}$) e pequeno grau de ionização ($\alpha \sim 1\%$, $n_e \sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$). (Fig. 1 e 2).

3 - PROCESSO DE CONDICIONAMENTO

No plasma de RF a reação $e^- + H_2 \longrightarrow H + H + e^-$, gera um fluxo de átomos neutros de baixa energia que bombardeia as paredes da câmara de vácuo, formando compostos $-H_2O, CH_3, CH_4, CO$, etc. - com as impurezas presentes na superfície. Estas moléculas passam facilmente à câmara, sendo bombeadas pelo sistema de vácuo. (Fig. 3).

Verifica-se, como era esperado, uma produção grande de compostos no início do condicionamento, e um decréscimo monotônico com o tempo, refletindo a diminuição na densidade superficial de impurezas.

4 - SISTEMA EXPERIMENTAL (Fig. 4)

Parâmetros do vaso do TBR

- * Material: aço inoxidável 316 L. Não admite "baking".
- * Volume: 72 litros
- * Área: $1,3\text{m}^2$

Sistema de vácuo

- * Bomba turbomolecular de 450 l/s. Velocidade efetiva de bombeamento: 60 l/s
- * Pressão última: $1,5 \cdot 10^{-6} \text{mbar}$ (a 25°C)

Fonte de microondas

- * Magnetron 2M 172 J (SD) de 800 W, CW. $f = 2,45 \text{ GHz}$
- * Guia de onda. Material: alumínio. Secção transversal: $7,2 \times 2,8 \text{ cm}$. Propagação no modo TE_{10}

Fonte do campo magnético toroidal

- * Fonte trifásica com corrente ajustável através de núcleo móvel. Pode ser pulsada por tiristores.

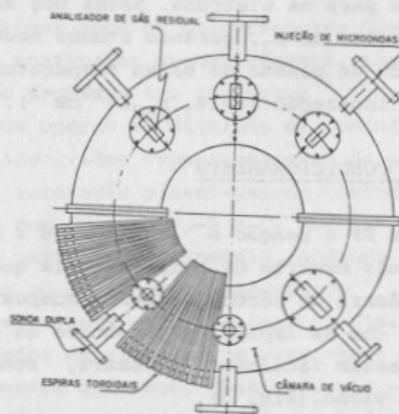
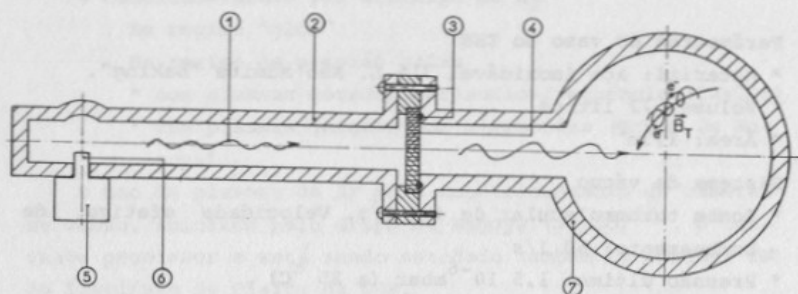


FIG 1: VISTA SUPERIOR DA CÂMARA DE VÁCUO DO TBR, MOSTRANDO 2 BLOCOS DE ESPIRAS TOROIDAIS.

Fig. 2 Sistema de injeção de microondas. Formação do Plasma.



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

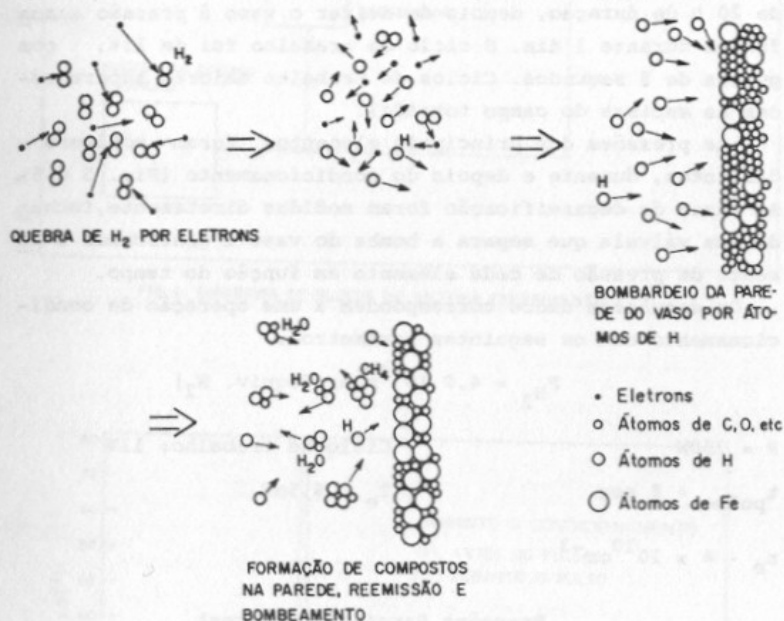


Fig. 3 - Processo de condicionamento da câmara de vácuo com plasma de H_2 .

Monitoração de pressões parciais

* Analisador de massa tipo quadrupolo (Leybold-Heraeus Q 200)

Medida de temperatura e densidade do plasma: sonda dupla.

5 - RESULTADOS

Foram realizadas várias experiências de condicionamento de 20 h de duração, depois de deixar o vaso à pressão atmosférica durante 1 dia. O ciclo de trabalho foi de 11%, com pulsos de 8 segundos. Ciclos de trabalho maiores superaquecem as espiras do campo toroidal.

As pressões dos principais elementos foram monitoradas antes, durante e depois do condicionamento (Fig. 5 e 6). As taxas de degaseificação foram medidas diretamente, fechando uma válvula que separa a bomba do vaso e graficando o aumento de pressão de cada elemento em função do tempo.

Os seguintes dados correspondem a uma operação de condicionamento com os seguintes parâmetros:

$$P_{H_2} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ mbar (equiv. } N_2)$$

$$P = 750W$$

$$\text{Ciclo de trabalho: } 11\%$$

$$t_{\text{pulso}} = 8 \text{ seg.}$$

$$T_e = 6,5eV$$

$$n_e = 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Pressões Parciais (Ampères)

<u>nº de massa</u>	<u>Elemento</u>	<u>Antes</u>	<u>Depois</u>	<u>Taxa de Redução(*)</u>
2	H ₂	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$4,4 \cdot 10^{-11}$	0,5
16	CH ₄	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	1,9
18	H ₂ O	$5,6 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	2,2
28	N ₂ , CO, C ₂ H ₄	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	1,3
32	O ₂	$6,1 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-13}$	8,1

(*) Taxa de redução = antes/depois

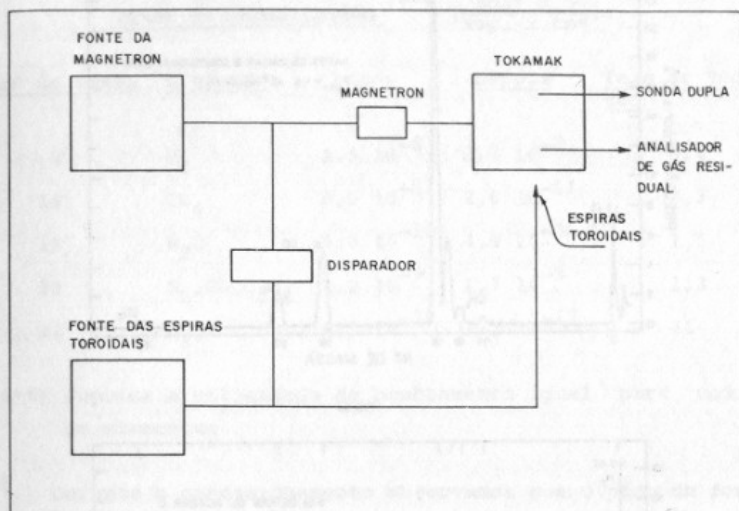


FIG. 4 DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA EXPERIMENTAL

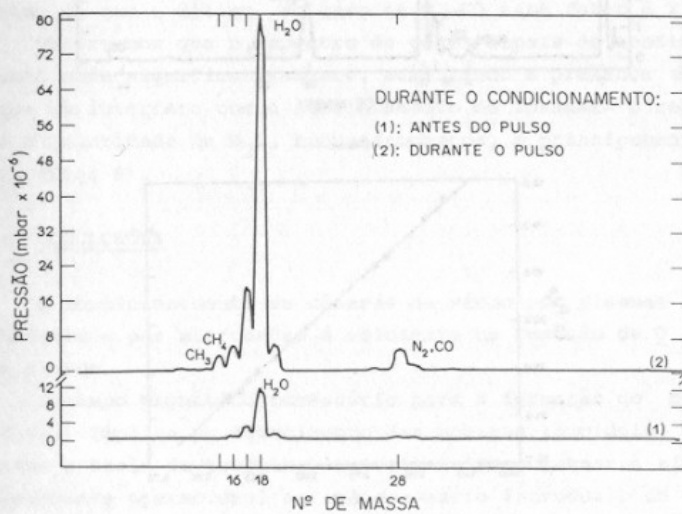


FIG. 5

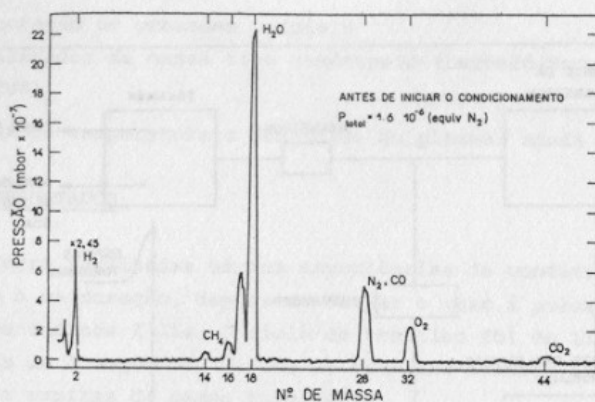


FIG. 6a

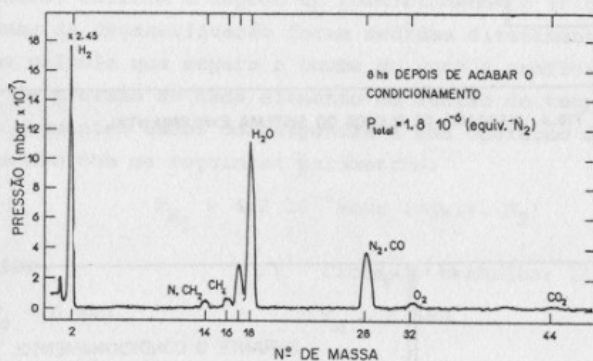


FIG. 6b

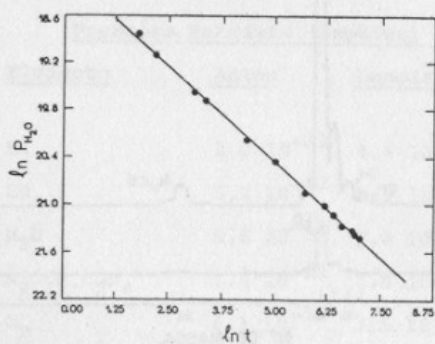


FIG. 7: VALORES DE PICO DA PRESSÃO DA ÁGUA DURANTE O CONDICIONAMENTO $P_{H_2O}(t) = 5.7 \cdot 10^{-6} t^{-0.48}$ (t em min, P_{H_2O} em mbar)

Taxas de Degaseificação (**) [$\frac{\text{mbar} \times \text{l}}{\text{seg.} \times \text{cm}^2}$]

<u>nº de massa</u>	<u>Elemento</u>	<u>Antes</u>	<u>Depois</u>	<u>Taxa de Redu ção</u>
2	H ₂	1,5 10 ⁻⁸	3,7 10 ⁻⁸	0,4
16	CH ₄	8,5 10 ⁻¹¹	2,6 10 ⁻¹¹	3,3
18	H ₂ O	5,8 10 ⁻¹⁰	4,0 10 ⁻¹⁰	1,5
28	N ₂ , CO, C ₂ H ₄	2,2 10 ⁻⁹	1,7 10 ⁻⁹	1,3
32	O ₂	4,5 10 ⁻¹⁰	1,1 10 ⁻¹¹	41

(**) Supomos a velocidade de bombeamento igual para todos os elementos

Durante o condicionamento observamos que o pico de formação de compostos cai inicialmente muito rapidamente com o tempo, tornando-se depois o decréscimo muito lento. O pico da água ajusta-se bem a uma curva que é quase o inverso da raiz quadrada do tempo: $P_{H_2O} = 5,7 \cdot 10^{-4} t^{-0,48}$ (t em minutos, P em mbar). (Fig. 7). O primeiro pico da água é vinte vezes maior do que o último. No caso de N₂-CO este fator é 25.

Observamos que o espectro de gases depois do condicionamento muda significativamente, aumentando a presença de H₂ -que não interfere com o funcionamento do Tokamak- e reduzindo a quantidade de H₂O, hidrocarbonetos, e principalmente de O₂. (Fig. 6).

6 - CONCLUSÕES

O condicionamento de câmaras de vácuo por plasmas de H₂ produzidos por microondas é eficiente na remoção de O e C da parede.

O campo magnético necessário para a formação do plasma (875 G) implica no aquecimento das bobinas toroidais, limitando o ciclo de trabalho admissível. Para tornar o sistema plenamente operacional seria necessário introduzir um esquema eficiente de refrigeração das espiras toroidais.

Comparado com o sistema de condicionamento de Taylor -que usa um oscilador de potência na faixa de 10 KHz -, o sistema de microondas é muito mais barato. Uma magnetron custa US\$ 30, enquanto que o triodo de potência do oscilador custa US\$ 1300.

As principais limitações deste sistema de condicionamento em relação ao proposto por Taylor são:

* Para a mesma densidade eletrônica o processo Taylor cria plasmas de temperaturas mais baixas, facilitando a formação e bombeamento de compostos.

* O fluxo de átomos neutros na parede por unidade de tempo é dado por $F = n_e n_2 k_2 V_p^{(4)}$

n_e : densidade eletrônica

n_2 : densidade de H_2

k_2 : probabilidade de dissociação de H_2 por e^-

V_p : volume do plasma

A densidade eletrônica máxima em um plasma gerado por microondas é proporcional à frequência destas. Para $f = 2,45$ GHz, obtemos $n_e(\text{max}) = 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Assim, o fluxo de átomos neutros é menor do que no processo Taylor, aumentando o tempo necessário para o condicionamento.

BIBLIOGRAFIA

1. H.F. Dylla. "A Review of the Wall Problem and Conditioning Techniques for Tokamaks". Journal of Nuclear Materials 93 & 94 (1980), 61-74.
2. L.Oren, R.J. Taylor. "Trapping and Removal of Oxygen in Tokamaks". Nuclear Fusion 17,6, (1977).
3. Y.Sakamoto et al. "ECR Discharge Cleaning Experiment in the JIPP T-II" - Nagoya Research Report IPPJ-539 (1981).
4. N.Noda et al. "Study of Discharge Cleaning Process in JIPP T-II Tours by Residual Gas Analyser". Nagoya, Research Report IPPJ-618 (1982).