

UTILIZAÇÃO DE UM ANALISADOR QUADRUPOLO DE MASSA PARA
MONITORAMENTO DE PLASMAS DE ELEMENTOS METÁLICOS

E. Del Bosco, R.S. Dallaqua e G.O. Ludwig

Instituto de Pesquisas Espaciais, Conselho Nacional
de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Caixa Pos-
tal 515, 12200 São José dos Campos, SP

Apresentam-se os primeiros resultados da utiliza-
ção de um espectrômetro de massa, do tipo quadrupolo
elétrico, na análise do plasma gerado na centrífuga
de plasma desenvolvida no INPE. O experimento consis-
te basicamente em uma coluna cilíndrica de plasma to-
talmente ionizado em rotação, produzida por uma descar-
ga elétrica em arco no vácuo, onde existe um campo mag-
nético intenso. A descarga é iniciada por um laser de
rubí de alta potência que é disparado sobre o catodo
constituído do material que se deseja processar a se-
paração de isótopos. Produziu-se plasma de carbono e,
através do espectro de massa obtido, mediu-se uma re-
solução de 40 e fator de enriquecimento de 167% para
o ^{13}C .

Plasma, Centrífuga, Isótopos, Espectrômetro

1. INTRODUÇÃO

De uma maneira geral, existem dois métodos básicos de separação de isótopos: através da energização seletiva de uma espécie isotópica ou pela energização diferencial de todas as espécies. Os processos de excitação por laser e por ressonância de ciclotron dos íons são exemplos do primeiro método, e os de ultracentrifugação, difusão gasosa e centrífuga de plasma são exemplos de segundo método. Em qualquer caso, um dos parâmetros básicos para a avaliação de uma unidade de separação é o fator de separação α_0 , definido como a razão entre as relações de abundância das frações enriquecidas e empobrecidas. Assim, sendo n_1 a densidade da espécie de interesse e n_2 a densidade da espécie rejeitada, o fator de separação para uma mistura binária é dado por:

$$\alpha_0 = \frac{(n_1/n_2)}{(n_1/n_2)_0},$$

onde o índice 0 indica o valor inicial da abundância relativa, isto é, antes de ser realizado o enriquecimento.

No processo da difusão gasosa, que é utilizado comercialmente para o enriquecimento do urânio, o fator de separação teórico de uma unidade de processamento é dado por:

$$\alpha_0 = (m_2/m_1)^{1/2},$$

onde m_2 é a massa do isótopo pesado e m_1 a massa do isótopo leve. Tais massas, para o urânio, resultam em $\alpha_0 = 1.0064$, sendo necessário mais de 250 estágios para atingir o grau de enriquecimento de 3,5% de ^{235}U ($\alpha_0 = 5.07$).

Nas centrífugas mecânicas, processo que vem se destacando como substituído da difusão gasosa, o fator de separação por unidade de processamento é dado por:

$$\alpha_0 = \exp[|m_1 - m_2| (R\Omega)^2 / 2k_B T],$$

onde R é a distância do eixo à parede do cilindro, Ω a velocidade angular (rotação de corpo rígido), k_B a constante de Boltzmann e T a temperatura da mistura. Para uma temperatura típica de 310K e uma velocidade periférica de 500 m/s, obtém-se $\alpha_0 = 1,16$ ($\Delta m = 3\text{amu}$), de modo que o fator de separação total pode ser atingido em 11 estágios. A limitação na velocidade periférica, da ordem da velocidade acústica, resulta em fatores de separação relativamente baixos.

Fatores de separação maiores podem ser obtidos na centrífuga de plasma, cuja operação não depende de movimento de partes mecânicas, possibilitando atingir velocidades de rotação muito mais elevadas. Na sua geometria mais simples, a centrífuga está ilustrada na Figura 1.

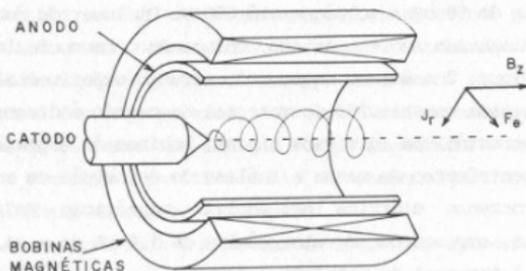


Fig. 1 - Esquema da centrífuga de plasma.

O plasma está contido entre dois eletrodos concêntricos. A densidade de corrente radial, j_r , e o campo magnético axial, B_z , produzem uma força $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ na direção azimutal. Assim, a rotação é produzida por uma força volumétrica de origem eletromagnética, que atua diretamente sobre as partículas. Define-se para a centrifugação de plasma um fator de separação modificado, α , que pode ser escrito na forma:

$$\alpha = \frac{(n_1^{1/Z_1}/n_2^{1/Z_2})_R}{(n_1^{1/Z_1}/n_2^{1/Z_2})_0} = \exp \left[-\frac{1}{2k_B T} \left(\frac{m_1}{Z_1} - \frac{m_2}{Z_2} \right) (R\Omega)^2 \right],$$

onde Z é o número de carga das partículas. No caso em que $Z_1 = Z_2$ obtém-se o mesmo resultado da centrifugação mecânica. Para uma velocidade de rotação da ordem de $1,03 \times 10^4$ m/s e temperatura típica de 1eV, o enriquecimento do urânio poderia ser realizado em apenas um estágio. Experimentalmente, já foram observadas velocidades de rotação desta ordem e até maiores (1).

2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A centrifugação de plasma do INPE opera com plasma totalmente ionizado de forma a evitar limitações na velocidade de rotação causada pelas partículas neutras.

Uma câmara cilíndrica em aço inoxidável com 100cm de comprimento e 20cm de diâmetro é utilizada para vácuo. O sistema de vácuo é formado por uma bomba difusora de 700 l/s, ligada ao vaso, e uma bomba turbomolecular de 40 l/s, acoplada ao espectrômetro de massa.

Um conjunto de oito bobinas envolve a câmara de vácuo, e é dimensionado para produzir um campo magnético até 14 kG de pico, quando um banco de capacitores eletrolíticos, com capacitância de 20 mF e voltagem até 1,6 kV, é descarregado.

Um eletrodo colocado no eixo do cilindro é polarizado negativamente em relação à câmara por um banco de capacitores eletrolíticos, com capacitância de 50 mF e voltagem até 600 V. Um laser de rubi de alta potência é disparado sobre o catodo, chaveando o banco de capacitores do arco. A Figura 2 mostra o esquema do arranjo experimental.

O plasma constituído do material do catodo é diagnosticado com sondas eletrostáticas (diversos tipos), bobinas de Rogowski, sonda magnética, espectrômetro de massa e análise de deposição em substratos.

A corrente elétrica nas espiras magnéticas, medida com bobina de Rogowski, apresentou um valor máximo de 1,6 kA de pico. A Figura 3 mostra o perfil temporal da corrente elétrica.

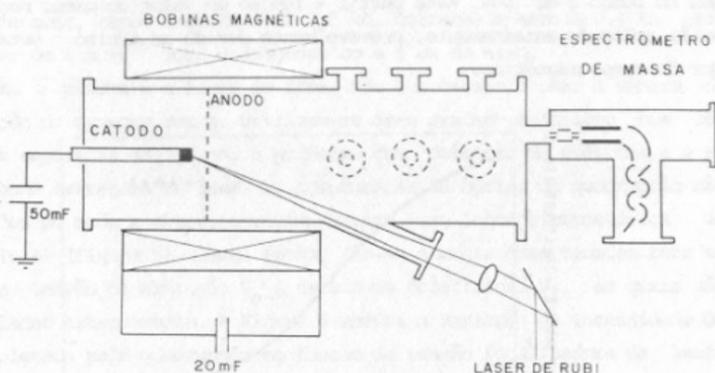


Fig. 2 - Arranjo experimental.

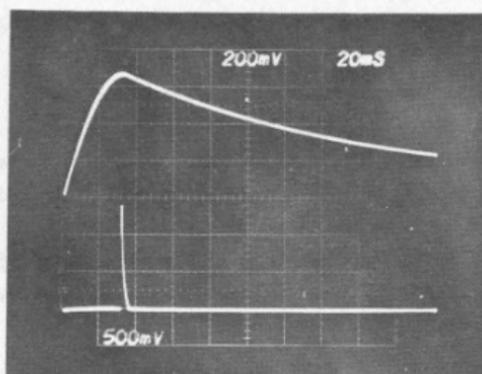


Fig. 3 - Sup.: Perfil da corrente nas bobinas magnéticas (0,45 kA/V).
 Inf.: Corrente de arco (1,76 kA/V).

O campo magnético, medido com sonda magnética, apresenta perfil temporal igual ao da corrente nas espiras. Na região central da câmara atinjam-se valores de 13,3 kG de pico. O campo magnético é praticamente constante durante a descarga em arco. A Figura 3 realça a diferença nas escalas de tempo da corrente nas espiras (campo magnético) e corrente de arco, e a Figura 4 mostra o perfil espacial do campo magnético, no eixo, em função da distância ao centro das espiras.

A corrente de arco, medida com bobina de Rogowski, apresenta valores que variam de 1 a 10 kA, dependendo da tensão no banco de capacitores. A Figura 7 mostra o perfil temporal da corrente de arco, quando a volta

gem no banco é de 100V. Este perfil é função do valor do campo magnético axial aplicado externamente, provavelmente devido ao efeito estabilizador do campo magnético.

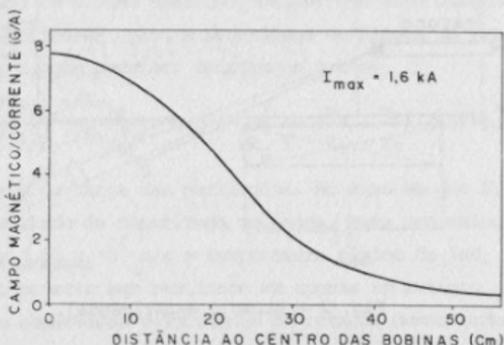


Fig. 4 - Perfil espacial do campo magnético em função da distância ao centro do conjunto de bobinas.

A rotação do plasma é verificada utilizando sondas eletrostáticas, e a velocidade angular de rotação é estimada a partir do ângulo de inclinação do material depositado em anteparos colocados atrás de uma placa onde existe uma fenda. Mediu-se a velocidade de 2×10^5 rad/s para plasmas de carbono com campo magnético de 2,5 kG.

Embora ainda não medidos na centrífuga, o plasma apresenta densidade de $(3-5) \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ e temperatura em torno de (1-3) eV, que são valores típicos deste tipo de experimento.

3. MEDIDAS COM ESPECTRÔMETRO DE MASSA

Para medir a abundância relativa dos isótopos no plasma e portanto o fator de separação, instalou-se um espectrômetro de massa, do tipo quadrupolo elétrico. O fato de existirem vários fatores conflitantes entre as condições ideais de funcionamento do quadrupolo e o experimento da centrífuga, como por exemplo: plasma de elementos metálicos (carbono, cobre, zircônio), plasma pulsado (- 2ms), campo magnético intenso (- 14kG), plasma de alta densidade (10^{13}cm^{-3}) e região de extração dos íons com potencial negativo (- 10V), a etapa referente aos testes do espectrômetro, no monitoramento do plasma, é de grande importância e se destina a confirmar a viabilidade da utilização do aparelho neste tipo de experimento.

Para as medidas realizadas são fixados alguns parâmetros como: plasma de carbono, campo magnético de 2,5 kG, corrente de arco de 2,4 kA, pressão base de 2×10^{-6} Torr e diagnóstico a 8 cm do eixo.

Como o plasma é a fonte de íons, não é necessário usar a câmara de ionização do espectrômetro. Utilizam-se duas grades metálicas com 200 fios/cm separadas de 1,5 mm, a primeira como coletora de elétrons, e a segunda como extratora de íons. Os componentes da óptica do quadrupolo são religados de modo a obter, aproximadamente, uma lente eletrostática do tipo einzel (Figura 5). Desta forma, têm-se somente duas tensões como variáveis, tensão de extração V_e e tensão de focalização V_f , as quais são controladas externamente. A Figura 6 mostra a variação da intensidade de $^{12}\text{C}^+$ coletado pelo quadrupolo em função da tensão focalizadora da lente para $V_e = -20\text{V}$, de onde se determina a tensão de focalização $V_f = -100\text{V}$.

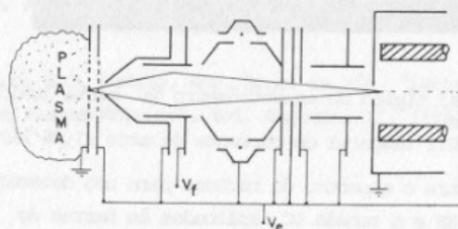


Fig. 5 - Esquema da lente eletrostática.

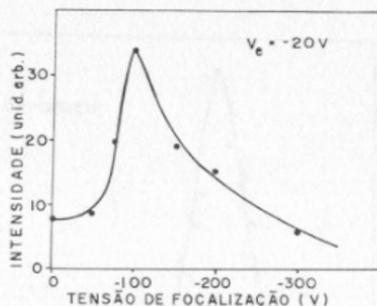


Fig. 6 - Perfil da intensidade de $^{12}\text{C}^+$ coletado em função da tensão de focalização.

Para medir a resolução e testar a sensibilidade do quadrupolo, com as modificações realizadas, contruiu-se o espectro de massa do carbono ($^{12}\text{C}^+$ e $^{13}\text{C}^+$). Cada ponto do espectro corresponde à média de dez dispa

ros da máquina. O espectro completo é obtido incrementando a massa de 0.1 amu. A Figura 7 mostra um sinal típico obtido com o quadrupolo e a corrente de arco em função do tempo.

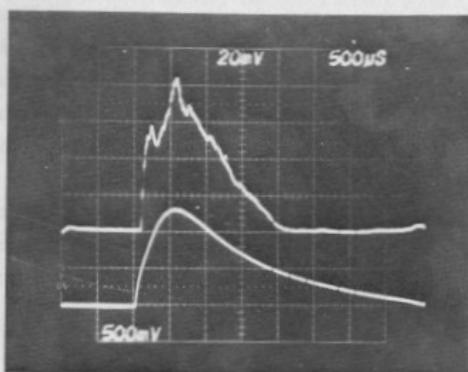


Fig. 7 - Sup.: Sinal típico do espectrômetro de massa (unidades arbitrárias).

Inf.: Perfil temporal de corrente de arco (1,76 kA/V).

A Figura 8 mostra o espectro do carbono para uma determinada relação entre a tensão de RF e a tensão DC, aplicadas às barras do quadrupolo, assim como para as tensões V_f e V_e , escolhidas anteriormente para a lente eletrostática. A resolução do quadrupolo, estimada a partir do espectro é $R_{50\%} = 40$.

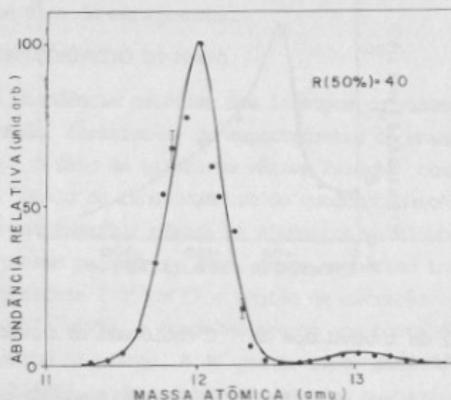


Fig. 8 - Espectro do carbono obtido com o quadrupolo elétrico na centrífuga de plasma.

Do espectro de carbono, normalizado, medido a 8 cm do eixo da câmara e com campo de 2,5 kG, nota-se que a relação das abundâncias é $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 37$; sabendo que a relação natural é $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \approx 99$ obtém-se que o fator de separação de ^{13}C em relação ao ^{12}C é de $\alpha_0 = 2,67$.

4. CONCLUSÃO

O espectrômetro de massa, do tipo quadrupolo elétrico, mostrou-se adequado para a análise do plasma gerado na centrífuga. Com a otimização dos parâmetros da lente eletrostática e dos recursos do aparelho, espera-se melhorar a resolução, o que é necessário para medidas de isótopos mais pesados.

O resultado de enriquecimento de 167% de ^{13}C será sistematicamente estudado para sua confirmação.

5. REFERÊNCIAS

- (1) M. Geva, M. Krishnan and J.L. Hirshfield, J. Appl. Phys. 85 (1984), 1398.
- (2) E. Del Bosco, G.O. Ludwig, Rev. Bras. de Fís. "Latin American Workshop on Plasma Physics", Vol. Especial II, (1982) 493.