

# PARÂMETROS RELEVANTES NA IRRADIAÇÃO DE ÁGUA ENRIQUECIDA EM CÍCLOTRON, VISANDO A OTIMIZAÇÃO E A SEGURANÇA OPERACIONAL NA OBTENÇÃO DO ÍON $^{18}\text{F}^-$

Valdir Sciani, Hylton Matsuda, André L. Lapolli, Luis Carlos A. Sumyia, Osvaldo L. Costa e Wanderley de Lima

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Caixa Postal 11049  
05422-970, São Paulo, Brasil

## RESUMO

Com o intuito de aumentar a confiabilidade e a segurança operacional durante as irradiações de água enriquecida para a obtenção do íon  $^{18}\text{F}^-$  no IPEN-CNEN/SP, foram instalados três sistemas de monitoração e controle de parâmetros sensíveis ao perfil e a corrente do feixe: diafragma formado por quatro setores com áreas exatamente iguais e sem caminho livre ao feixe entre os setores, sensor de pressão interna da câmara de irradiação e termopar para medir a temperatura do gás de refrigeração das janelas. O sistema de controle é composto por um condicionador de sinais, uma placa de aquisição de dados e o software propriamente dito. A parte de visualização e controle foi criada em Visual Basic 6.0. Constatou-se que, a pressão interna é o melhor indicador para o posicionamento do feixe sendo que, pequenos desvios da condição ideal, provocam aumento da pressão.

## I. INTRODUÇÃO

Dentre os radioisótopos utilizados em diagnósticos médicos existem quatro, cujo decaimento ocorre por emissão de pósitrons:  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{15}\text{O}$  e  $^{13}\text{N}$ . Uma vez emitido, o pósitron é aniquilado ao encontrar um elétron, dando origem a dois fótons de 511 keV em direções opostas. Em particular, em São Paulo, moléculas de glicose marcadas com  $^{18}\text{F}$ , o  $^{18}\text{FDG}$ , tem seu uso em constante crescimento, devido, principalmente, ao desenvolvimento de câmaras do tipo SPECT, equipadas com duas cabeças, que permitem colimação com circuito de coincidência, capazes de detectar estes fótons provenientes da aniquilação pósitron-elétron. A utilização de  $^{18}\text{FDG}$  se estende desde a neurologia, a psiquiatria, a cardiologia até a alguns casos de oncologia.

O IPEN-CNEN/SP produz  $^{18}\text{FDG}$  rotineiramente desde 1998, inicialmente com um ciclotron modelo CV-28, fabricado pela empresa americana The Cyclotron Corporation e, posteriormente, com o modelo Cyclone 30, adquirido da empresa belga Ion Beam Applications (IBA).

Até janeiro de 2000, a produção de  $^{18}\text{FDG}$  no IPEN e a distribuição para a classe médica era feita a partir da irradiação de água enriquecida em porta-alvo de pequeno volume (300  $\mu\text{L}$ ), adquirido da IBA. Com a demanda em acelerado crescimento, visando a obtenção de atividades cada vez maiores do íon  $^{18}\text{F}^-$  por irradiação, foi trocado o corpo deste porta-alvo por um de grande volume (2 mL), com formato semi-hemisférico em prata, também fornecido pela IBA. Nos dois casos, o íon  $^{18}\text{F}^-$  é obtido a partir da irradiação com prótons de água enriquecida no isótopo  $^{18}\text{O}$  através da reação nuclear  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ . Este porta-alvo está

instalado na linha de feixe externo 1.2 do ciclotron Cyclone 30 do IPEN e é composto basicamente por um colimador cônico com diâmetro final de 10 mm, uma flange suporte para duas janelas de Havar de 50 e 25  $\mu\text{m}$ , respectivamente, refrigeradas com gás Hélio, um corpo de prata, refrigerado com água deionizada, contendo uma cavidade semi-hemisférica de 2 mL (que é a cavidade onde a água enriquecida é irradiada) e uma válvula de alta pressão de seis vias, para preenchimento e descarga da água irradiada e purga.

Como as irradiações são feitas com a cavidade de prata hermeticamente fechada, um aumento excessivo da pressão interna pode ocasionar um rompimento das janelas, acarretando tanto na perda da água enriquecida (de alto custo da ordem de US\$ 220/g) como na produção e no fornecimento de  $^{18}\text{FDG}$ . Com a finalidade de aumentar a confiabilidade e a segurança operacional durante as irradiações três sistemas de monitoração e controle de parâmetros sensíveis ao perfil do feixe e a corrente foram instalados no porta-alvo adquirido da IBA: diafragma de quatro setores com áreas exatamente iguais, sem caminho livre ao feixe entre os setores com colimador de diâmetro de 11 mm, sensor de pressão interna da câmara de irradiação e termopar para medição da temperatura do gás Hélio de refrigeração das janelas.

Neste trabalho, são descritos estes três sistemas bem como as informações obtidas durante as irradiações, que visam otimizar a obtenção do íon  $^{18}\text{F}^-$ .

## II. PARTE EXPERIMENTAL

**Diafragma de quatro setores.** O posicionamento do feixe no alvo foi conseguido com a instalação de um colimador de 11 mm de diâmetro, constituído por quatro setores independentes com áreas exatamente iguais e sem caminho livre ao feixe entre os setores. Cada setor é composto por um bloco de alumínio refrigerado à água. A figura 1 mostra a geometria dos quatro setores em sua montagem final. A flange de fixação e de isolamento não aparecem na figura.

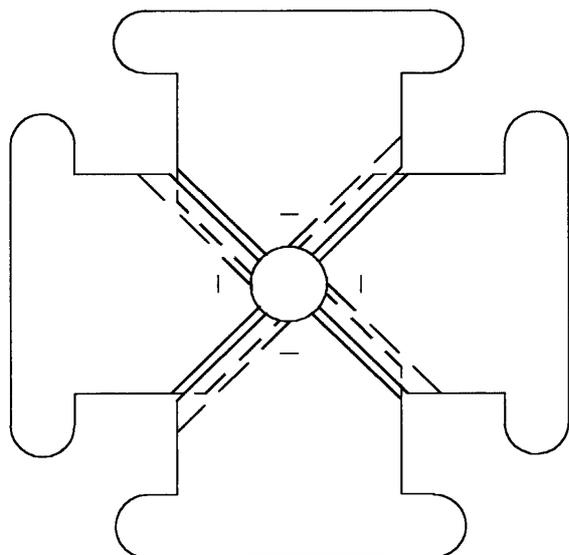


Figura 1. Geometria dos quatro setores, em sua montagem final

**Sistema de controle.** O sistema de controle é composto por um condicionador de sinais, uma placa de aquisição de dados e o software propriamente dito. O primeiro consiste de amplificadores operacionais com entrada MOSFET, portanto, de alta impedância, que operam tanto como conversores de corrente/tensão como amplificadores de sinais de baixo ruído. O segundo, trata-se de um conversor analógico/digital com entrada multiplexada para vários sinais. Por último, o software de controle e monitoramento do sistema, criado em linguagem C para leitura dos sinais de entrada e configuração da placa de aquisição. Porém, a parte de visualização (lay-out) e controle foi criada em Visual Basic 6.0, possibilitando um monitoramento dos parâmetros acompanhados em ambiente gráfico Windows 32-bit.

**Sensor de pressão.** A medida da pressão interna durante a irradiação foi feita com a instalação de um sensor miniatura, modelo XTM-190, fabricado pela empresa Kulite Semiconductor Ltd. Este sensor possui a vantagem de seu tamanho bastante reduzido, gerando um “volume morto” desprezível. O modelo utilizado possui sensibilidade de 2,18 mV/bar.

**Medida da temperatura.** A medida da temperatura do gás Hélio de refrigeração foi feita com a instalação de um termopar tipo K, fixado na saída da flange de fixação das janelas.

**Irradiações.** As irradiações foram feitas com prótons na linha de feixe 1.2 do ciclotron Cyclone 30. A energia

incidente na água enriquecida, no caso a 94% em  $^{18}\text{O}$ , foi de 18 MeV e as correntes foram de 27  $\mu\text{A}$ .

A figura 2 mostra o sistema de irradiação de água enriquecida montado na linha de feixe do ciclotron Cyclone 30, onde podem ser vistas as implementações feitas para aumentar a segurança operacional.

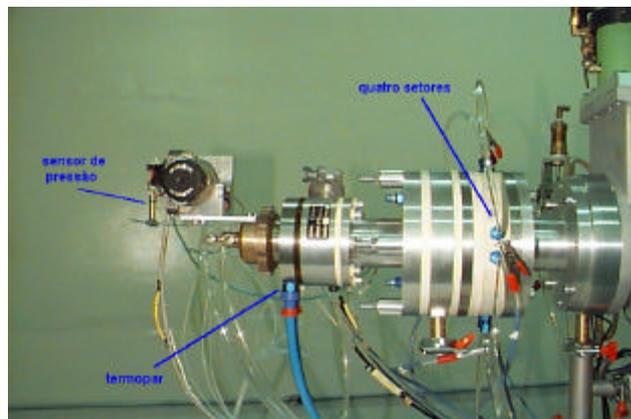


Figura 2. Montagem do sistema de irradiação de água enriquecida na linha de feixe do ciclotron Cyclone 30

## III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A energia dos prótons provenientes do ciclotron foi fixada em 24 MeV. Um degradador de alumínio, de 1 mm de espessura, foi colocado entre o feixe e as janelas que separam o vácuo da linha de feixe da água enriquecida a ser irradiada, com a finalidade de espalhar o feixe incidente no alvo propriamente dito. Após atravessar este degradador de alumínio e as duas janelas de Havar, de 50 e 25  $\mu\text{m}$  de espessura, a energia incidente na água era de 18 MeV, valor nominal do fabricante do porta-alvo, a IBA. A corrente utilizada nas irradiações foi de 27  $\mu\text{A}$ . A posição do feixe incidente foi acompanhada com auxílio do colimador de quatro setores. Devido à incidência do feixe de prótons nos respectivos setores é gerada uma corrente induzida nos mesmos. Estes sinais, por sua vez, são conduzidos até o condicionador de sinais para a conversão da corrente elétrica em tensão e também a sua amplificação. Os sinais, já amplificados, são levados até a placa de aquisição de dados, responsável pelas conversões do sinal analógico em digital, para que este possa ser interpretado e manipulado por um computador. Então, o software faz as configurações necessárias (pré-ajuste, ganho, etc.) e também a leitura dos respectivos canais da placa, de modo a permitir a observação, na tela de um computador, o posicionamento e a centralização do feixe de íons. A figura 3 mostra a tela no computador, colocado na sala de controle do ciclotron, onde o operador pode ajustar os parâmetros, principalmente de transporte do feixe, para uma melhor centralização no alvo. O sistema de quatro setores aparece na parte esquerda da tela. A parte direita é correspondente a um segundo conjunto de quatro setores, que será instalado para verificar o alinhamento do sistema de irradiação em relação à linha de feixe.



Figura 3. Tela de Controle dos quatro setores, pressão e temperatura

Para a corrente utilizada, de 27  $\mu\text{A}$ , a condição otimizada foi alcançada quando o feixe foi espalhado de tal maneira que cada setor apresentou corrente de aproximadamente 1  $\mu\text{A}$  e a razão entre a corrente do alvo e a do colimador cônico atingiu cerca de 0,7.

Além da otimização com o colimador de quatro setores, o acompanhamento da pressão interna na câmara de irradiação se mostrou de vital importância para a segurança operacional durante as irradiações para a produção do íon  $^{18}\text{F}^-$ . A pressão interna está relacionada com o preenchimento, a forma e o volume do alvo e também com a penetração do feixe de prótons. No caso do presente trabalho, o alvo foi preenchido com cerca de 85 % do volume total, permitindo uma expansão durante a irradiação, já que todas as saídas da câmara permanecem fechadas. Para correntes de 27  $\mu\text{A}$ , a pressão interna atingiu aproximadamente 5 bar, valor comparável ao obtido por Ghyoot e colaboradores<sup>[1]</sup>. Este valor permanece relativamente estável durante toda a irradiação, com pequenas oscilações. Além disto, a pressão volta rapidamente ao seu valor inicial quando o feixe é desligado. Foi observado que, um posicionamento não adequado do feixe no alvo durante a otimização, indicando um desvio no perfil ideal do feixe, principalmente pela sua incidência no “volume morto” do alvo (volume não preenchido com água), o volume de expansão, causa um aumento significativo da pressão interna, mesmo com baixas correntes, não retornando ao seu valor inicial com a interrupção do feixe. A sensibilidade na variação da pressão pode ser utilizada para otimização no software de controle do ciclotron: o estabelecimento de um limite superior para a pressão durante a irradiação para evitar a quebra das janelas de Havar, interativamente este associado com o controle da fonte de íons<sup>[1]</sup>.

O acompanhamento da pressão interna indica que, correntes de 35-40  $\mu\text{A}$  podem ser usadas com segurança neste porta-alvo<sup>[2]</sup>, limite razoável para janelas de Havar.

A temperatura do gás de refrigeração das janelas se mostrou bem menos sensível que a medida da pressão, principalmente no que diz respeito ao tempo de resposta. De qualquer maneira, é mais um indicativo a ser acompanhado durante a irradiação e é diretamente proporcional à intensidade de corrente do feixe. Para as irradiações com 27  $\mu\text{A}$ , a variação de temperatura do gás foi de 11°C, permanecendo constante durante toda a irradiação. Cabe salientar que, um trocador de calor adicional ao original da IBA foi colocado na saída do compressor.

Em irradiações com 20 minutos, foram produzidos cerca de 27.700 MBq (750 mCi) do íon  $^{18}\text{F}^-$ , com uma atividade de saturação de 9.250 MBq/ $\mu\text{A}$  (250 mCi/ $\mu\text{A}$ ), valor comparável ao obtido por Ghyoot e colaboradores<sup>[2]</sup>: em alvo com um volume de 1.810  $\mu\text{L}$  em prata, foi obtido 111.000 MBq (3 Ci) de  $^{18}\text{F}^-$  em irradiações de 60 minutos, com correntes de 30-35  $\mu\text{A}$ . Em alvo de titânio, de 1.100  $\mu\text{L}$  Becker e Erbe<sup>[3]</sup> obtiveram rendimentos típicos de obtenção de  $^{18}\text{F}^-$  de 85.000 MBq (2,3 Ci), em irradiações de duração de uma hora, com prótons de 18 MeV de energia e corrente de 50  $\mu\text{A}$ . De acordo com a IBA<sup>[4]</sup>, irradiações com este mesmo tipo de porta-alvo, obtém-se 188.700 MBq (5,1 Ci) de  $^{18}\text{F}^-$  em irradiações de duas horas de duração, com prótons de 18 MeV e correntes de 40  $\mu\text{A}$ , apresentando um rendimento de saturação de 8769 MBq/ $\mu\text{A}$  (237 mCi/ $\mu\text{A}$ ).

#### IV. CONCLUSÕES

Com a finalidade de aumentar a confiabilidade e a segurança operacional durante as irradiações três sistemas de monitoração e controle de parâmetros sensíveis ao perfil do feixe e a corrente foram instalados no porta-alvo adquirido da IBA: diafragma de quatro setores com áreas exatamente iguais, sem caminho livre ao feixe entre os setores com colimador de diâmetro de 11 mm, sensor de pressão interna da câmara de irradiação e termopar para medição da temperatura do gás Hélio de refrigeração das janelas.

Irradiações para produções rotineiras de  $^{18}\text{F}^-$  com correntes de 27  $\mu\text{A}$  no alvo apresentaram uma condição otimizada quando o feixe foi espalhado de tal maneira que cada setor apresentou corrente de aproximadamente 1  $\mu\text{A}$  e a razão entre a corrente do alvo e do colimador cônico atingiu cerca de 0,7. Neste caso, a pressão interna durante a irradiação foi de 5 bar e a temperatura do gás variou de 11°C. Irradiações com 20 minutos de duração produziram cerca de 27.700 MBq (750 mCi) do íon  $^{18}\text{F}^-$ , com uma atividade de saturação de 9.250 MBq/ $\mu\text{A}$  (250 mCi/ $\mu\text{A}$ ).

Constatou-se que, a pressão interna é o melhor indicador para o posicionamento do feixe sendo que, pequenos desvios da condição ideal, provaocam aumento da pressão.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ghyoot, M.; Schmitz, F.; Tadino, V.; Verbruggen, R.; Vamecq, F.; Preusche, S. e Steinbach, J., **Measurement of the Inner Pressure of a Closed Líquid Target under Bombardment: na Easy Way to Optimize the Fluoride-18 Production.** a ser publicado.
- [2] Ghyoot, M.; Schmitz, F.; Verbruggen, R., Boeyen, Mishani, E. e Bormans, G., **Improvement of Fluoride-18 Production in IBA Targets.** In, SEVENTH WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY., JUNE, 8-11, 1997, Heidelberg-Germany. *Proceedings...* Heidelberg, p. 4-6, 1997.
- [3] Becker, D.W. e Erbe, D. **A New High Current Spherical Target Design for  $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$  with 18 MeV Protons.** In, SEVENTH WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY., JUNE, 8-11, 1997, Heidelberg-Germany. *Proceedings...* Heidelberg, p. 268-270, 1997.
- [4] **IBA Developments in the Field of Accelerators.** In, SECOND WORKSHOP ON IBA PET CYCLONE USERS. DECEMBER, 10-11, 1998, Leuven-Belgien. *Proceedings...*