

## AValiação DA HOMogeneidade DO FEIXE EXTERNO DO CÍCLOTRON CV-28 DO IPEN-CNEN/SP

Valdir Sciani, Liliane Landini M. Santos, Sumair G. de Araujo e Luís Carlos do A. Sumyia

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Caixa Postal 11049  
05508-900, São Paulo, Brasil

### RESUMO

A produção de radioisótopos em ciclotrons pode ser significativamente afetada pela homogeneidade do feixe durante as irradiações. Em feixes não homogêneos, a densidade de potência média não corresponde à medida em diferentes pontos no alvo, resultando em regiões com correntes muito maiores que outras (pontos quentes). Neste trabalho caracterizou-se o feixe externo do Ciclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP através de folhas monitoras de cobre, analisando-se os picos referentes aos radioisótopos  $^{62}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Zn}$  e  $^{65}\text{Zn}$ , formados a partir da irradiação com prótons. A caracterização consistiu em uma avaliação quantitativa da distribuição da intensidade de corrente do feixe na área irradiada e na correspondente energia incidente.

### I. INTRODUÇÃO

No IPEN-CNEN/SP está instalado um ciclotron CV-28, isócrono, de energia variável, capaz de acelerar prótons, dêuterons,  $^3\text{He}^{++}$  e partículas alfa, com energias máximas de 24, 14, 36 e 28 MeV, respectivamente. Embora possa acelerar estes quatro tipos de partículas, no momento, somente prótons com energia máxima estão sendo utilizados. Isto se deve ao fato de que a prioridade principal de sua utilização é a produção de radioisótopos para uso na Medicina Nuclear em diagnósticos. No caso do CV-28, podem ser produzidos, por exemplo,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{18}\text{F}$ , além de outros. Deste particular ponto de vista, ou seja, irradiações para a produção de radioisótopos, é desejável a utilização de correntes de feixe com intensidades máximas tecnicamente possíveis, sejam elas a máxima disponível no ciclotron ou a máxima suportada pelo alvo. Com isto, a produção em ciclotrons pode ser significativamente afetada pela homogeneidade do feixe durante as irradiações dos alvos, pois a densidade de potência efetiva gerada pelo mesmo é muito alta. Tipicamente, prótons de 24 MeV de energia e corrente de 30  $\mu\text{A}$  (valores típicos nas irradiações com feixe externo do ciclotron CV-28 do IPEN) geram uma potência de 720 W. Considerando o maior colimador utilizado, de 10 mm de diâmetro, é gerada uma densidade de potência maior que 900  $\text{W}/\text{cm}^2$ , a qual deve ser dissipada com refrigeração adequada no alvo. Em feixes não homogêneos, a densidade de potência média não corresponde à medida em diferentes pontos no alvo, resultando em regiões com correntes muito maiores que outras (pontos quentes). Este fato pode

provocar volatilização e, conseqüentemente, perda de massa do material alvo, geralmente constituído de um isótopo enriquecido, que possui um custo bastante alto. Além disto, como as secções de choque das reações nucleares variam de acordo com a energia da partícula incidente, o rendimento na obtenção de um determinado radioisótopo depende tanto da energia da partícula incidente quanto da espessura do alvo. Portanto, o conhecimento da energia incidente tem vital importância na otimização destes processos.

Com isto em mente, o objetivo do presente trabalho foi o de caracterizar o feixe externo da linha nº 4 do ciclotron CV-28 do IPEN através de folhas monitoras de cobre, analisando-se os picos referentes aos radioisótopos  $^{62}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Zn}$  e  $^{65}\text{Zn}$  formados a partir da irradiação com prótons. Esta linha de feixe é utilizada nas irradiações rotineiras de  $^{124}\text{TeO}_2$  (25-35  $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ /irradiação), com prótons de correntes típicas de 10  $\mu\text{A}$  e 24 MeV de energia, visando a obtenção de  $^{123}\text{I}$ . A caracterização consistiu em uma avaliação quantitativa da distribuição da intensidade de corrente do feixe na área irradiada e na correspondente energia incidente.

### II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As folhas de cobre utilizadas na caracterização do feixe externo do ciclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP possuíam 20 e 50  $\mu\text{m}$  de espessura, 99,99+% de pureza e foram fornecidas pela Goodfellow Cambridge Ltd.

As irradiações foram feitas na linha de feixe nº 4 (sem deflexão no distribuidor magnético). No transporte do feixe, além das bobinas de centralização e quadrupolares, foi usado um sistema de varredura, composto de duas bobinas colocadas perpendicularmente entre si. No caso do presente trabalho, varreu-se o feixe horizontal e verticalmente, com um campo magnético de 180 e 280 Hz, respectivamente, e amplitude de 2Vpp. Inicialmente o feixe foi desfocalizado em um colimador de (11x11) mm<sup>2</sup>, formado por quatro setores independentes e um "beam stopper" de acionamento pneumático, que possibilitava a medida do feixe central e suas extremidades. Uma vez otimizado, retirava-se o "beam stopper" e um segundo colimador, de 10 mm de diâmetro, definia a área final do feixe que incidia sobre as folhas de cobre. As irradiações foram feitas com prótons de correntes de 1 e 10 µA.

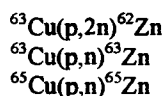
Para a avaliação da distribuição da intensidade de corrente do feixe, colimado no diâmetro de 10 mm, utilizou-se a técnica empregada por Wieland [1]: foi colocado entre o feixe e a folha de cobre um monitor de perfil, constituído de uma flange de alumínio com sete orifícios de diâmetro 1,5 mm, um localizado no centro e outros seis equidistantes entre si, formando um ângulo de 60° situados a uma distância, centro a centro, de 6 mm.

Para a avaliação da energia do feixe, nenhum anteparo entre o feixe e a folha de cobre foi colocado, sendo empregados dois métodos. No primeiro [2], uma única folha de cobre foi utilizada e no segundo [3], foram irradiadas três folhas de cobre intercaladas por duas folhas de alumínio de 430 µm, que serviram como degradadores de energia.

Após as irradiações, foram determinadas as atividades induzidas nas amostras, utilizando-se um detector de Ge(HP) acoplado a um sistema que adquiriu e processou os dados através de um microcomputador, adotando o programa Maestro II MCA, para analisar os picos referentes aos radionuclídeos <sup>62</sup>Zn, <sup>63</sup>Zn e <sup>65</sup>Zn. No caso da avaliação da distribuição da intensidade de corrente, após as irradiações, as sete áreas de interesse foram isoladas e mediu-se a atividade induzida em cada uma delas.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No intervalo de energia estudado, três reações induzidas pela irradiação de prótons em cobre natural são relevantes para a caracterização do feixe:



Os parâmetros de decaimento dos radionuclídeos formados podem ser visualizados na Tabela 1. A Fig.1 mostra a distribuição da intensidade de corrente para uma irradiação com prótons de corrente média de 0,87 µA, durante 69 min (dose 1 µA.h). Com o feixe desfocalizado,

TABELA 1. Parâmetros de decaimento de <sup>62</sup>Zn, <sup>63</sup>Zn e <sup>65</sup>Zn [2,3]

Nuclídeo	Meia-vida	Energia (keV)	Abundância (%)
<sup>62</sup> Zn	9,257 h	548,32	15,2
		596,60	25,7
<sup>63</sup> Zn	38 min	670	8,4
		962	6,6
<sup>65</sup> Zn	5856 h	1115,55	50,75

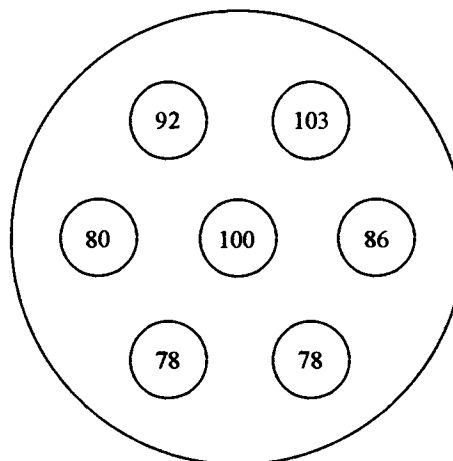


Figura 1. Distribuição da intensidade de corrente do feixe no alvo (%), para corrente média de prótons de 0,87 µA.

em cada setor independente a corrente foi de 0,4 µA. Os valores indicados na figura estão em percentagem, normalizados para a atividade medida da parte da folha de cobre correspondente ao orifício central. Cada valor foi calculado pela média das percentagens obtidas a partir das atividades correspondentes aos picos do <sup>62</sup>Zn (548,32 e 596,60 keV) e do <sup>65</sup>Zn (1115,55 keV). Pode ser visto que, a homogeneidade do feixe variou em 20 %, com uma determinada tendência de apresentar uma menor intensidade na parte inferior. Esta tendência é acentuada quando a irradiação é feita com correntes de feixe maiores. Assim, para simular as condições de irradiação aplicadas aos alvos de <sup>124</sup>TeO<sub>2</sub>, utilizados nas produções rotineiras de <sup>123</sup>I, a Fig. 2 mostra a distribuição da intensidade de corrente para uma irradiação com prótons de corrente média de 7,6 µA, durante 33 min (dose de 4,2 µA.h). Nota-se que existe um fator 2 entre o ponto mais quente e o mais frio da amostra, evidenciado na parte inferior da área irradiada. Os valores das correntes medidas nos setores independentes foi também de 0,4 µA cada. Este decréscimo de corrente nas laterais do alvo é esperado quando a corrente de feixe efetiva é aumentada, pois para tornar o feixe mais homogêneo, a desfocalização deveria ser tal que as correntes medidas nos setores tivessem valores bem

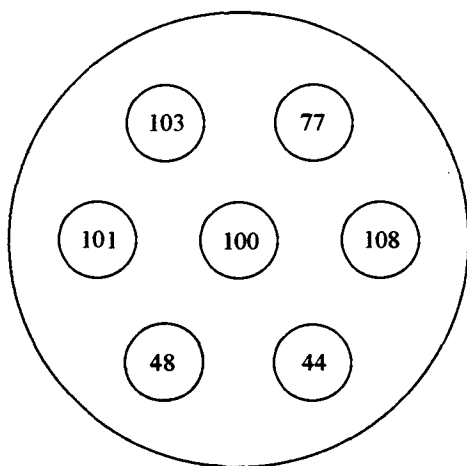


Figura 2. Distribuição da intensidade de corrente do feixe no alvo (%), para corrente média de prótons de 7,6  $\mu$ A.

maiores. Estes casos são praticamente inviáveis, considerando-se produções rotineiras, que exigem o máximo de corrente de feixe disponível e, tratando-se de um ciclotron de ions positivos, a corrente externa é limitada principalmente em virtude do sistema de extração, que absorve quase a metade do feixe produzido [4]. Por outro lado, com esta distribuição pode-se irradiar com correntes de 10 a 12  $\mu$ A nos alvos de  $^{124}\text{TeO}_2$  para a produção de  $^{123}\text{I}$ , sem perda significativa de material alvo.

É importante notar que, este procedimento é eficaz na otimização do feixe, o qual não foi o objetivo do presente trabalho. Isto deve ser conseguido em sucessivas irradiações, onde os parâmetros do ciclotron devem ser mudados em função das atividades obtidas nas sete áreas de interesse, até se chegar a uma simetria esférica, que é o ideal.

Em relação à estimativa da energia do feixe, basicamente três técnicas independentes são aplicadas: medidas do poder de freamento, da ativação através de reações monitoras e do tempo de voo [5].

Devido à sua simplicidade, no presente trabalho a avaliação foi feita por análise de ativação através de reações monitoras em  $^{nat}\text{Cu}$ , embora outras reações monitoras também possam ser empregadas, por exemplo,  $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{55}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$  [6] e  $^{nat}\text{Ti}(p,x)^{48}\text{V}$  [7].

A Fig. 3 mostra a energia incidente em função da frequência de oscilação dos prótons, correspondente ao posicionamento do defletor para a melhor eficiência de extração do feixe. As energias foram obtidas através do método descrito por Kopecký: elas foram determinadas comparando-se a razão entre as atividades de  $^{62}\text{Zn}$  e  $^{65}\text{Zn}$  produzidas simultaneamente (para energias de  $\approx 24$  MeV) com as razões das seções de choque de referência, obtidas pela técnica de empilhamento, a qual gerou um polinômio relacionando energia e as atividades envolvidas [2]. Assim, os valores constantes na Fig. 3 foram calculados através deste polinômio.

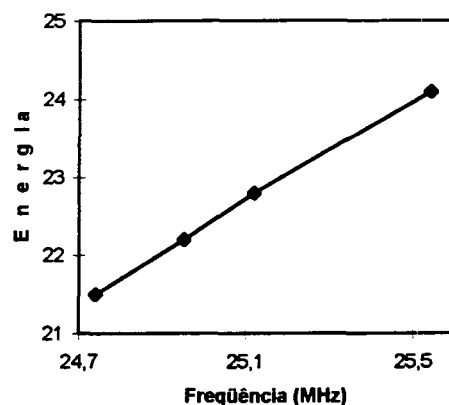


Figura 3. Energia incidente em função da frequência de oscilação dos prótons.

Pode-se notar que, o valor fornecido pelo fabricante [8], The Cyclotron Corporation (TCC), para a energia máxima de 24 MeV, correspondente à frequência de 25,468 MHz concorda com o valor obtido na Fig. 3. Também, o valor do raio máximo de extração, calculado a partir da reta ajustada da Fig. 3 (a 24 MeV), de 415,5 mm, concorda com o fornecido pela TCC, de 416 mm.

No segundo método de avaliação da energia, comparou-se a razão das seções de choque das reações envolvendo os radionuclídeos  $^{62}\text{Zn}$  e  $^{63}\text{Zn}$  com os dados de literatura, conforme descrito por Piel et al. [3]. Neste caso, foi utilizado um empilhamento de três folhas de cobre intercaladas por duas folhas de alumínio de 430  $\mu$ m de espessura, que serviram para separar, de maneira distinta, as energias incidentes nas folhas de cobre. A irradiação foi de 6 min, com corrente nominal de 150 nA e frequência de 24,991 MHz. Com as atividades de  $^{62}\text{Zn}$  e  $^{63}\text{Zn}$  medidas nas amostras de cobre, os cálculos de degradação de energia tabelados por Williamson et al. [9] e o procedimento comparativo efetuado por Piel et al. [3], as energias incidentes nas folhas de cobre foram de 22,6, 20,2 e 17,1 MeV respectivamente. Este valor de 22,6 MeV para a primeira folha de cobre é bastante coerente se comparado ao que pode ser obtido pelo método anterior: pela Fig. 3, para uma frequência de 24,991 MHz obtém-se um valor de energia de 22,35 MeV.

#### IV. CONCLUSÕES

As irradiações efetuadas no ciclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP são destinadas, quase em sua totalidade, para produzir radioisótopos usados em diagnósticos médicos. Neste caso, a homogeneidade do feixe desempenha um papel fundamental, uma vez que a densidade de potência efetiva gerada nos alvos é muito alta e a existência de pontos quentes pode significar perda de material alvo por volatilização. Também, o conhecimento do valor da energia incidente é importante no estudo das

funções de excitação. Este trabalho mostra a caracterização do feixe externo da linha nº 4, que é utilizada em irradiações de  $^{124}\text{TeO}_2$  para produções rotineiras de  $^{123}\text{I}$ .

Verificou-se que, um sistema composto por um diafragma de quatro setores independentes e um "beam stopper" de acionamento pneumático é um componente importante na otimização do feixe. A instalação de um sistema de varredura contribuiu sobremaneira para a homogeneidade do feixe. Para correntes baixas, de cerca de 1  $\mu\text{A}$ , o feixe pode ser considerado homogêneo dentro de 20 % e, para correntes de 10  $\mu\text{A}$ , existe um fator 2 entre o ponto mais quente e o mais frio do alvo. Desta maneira, os alvos de  $^{124}\text{TeO}_2$ , que eram irradiados com correntes de feixe de 5  $\mu\text{A}$ , passaram a ser irradiados com correntes de 10 a 12  $\mu\text{A}$ , sem perda significativa de massa.

Os resultados obtidos a partir das reações monitoras  $^{64}\text{Cu}(p,x)^{62,63,65}\text{Zn}$  mostraram um bom acordo com os fornecidos pelo fabricante em termos de energia máxima e os correspondentes valores da frequência e raio de extração.

#### REFERÊNCIAS

- [1] WIELAND, B.W., **A negative ion cyclotron using 11 MeV protons for the production of radionuclides for clinical positron tomography.** In, FIRST WORKSHOP ON TARGETRY AND TARGET CHEMISTRY, OCTOBER 4-7, 1985 Heidelberg. *Proceedings...* Heidelberg. P. 119-125, 1985.
- [2] KOPECKÝ, P. **Proton beam monitoring via  $\text{Cu}(p,x)^{58}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$  and  $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$  reactions in copper,** International Journal of Applied Radiation and Isotopes, vol. 36(8), p. 657-661, 1985.
- [3] PIEL, H., QAIM, S.M. and STÖCKLIN, G., **Excitation functions of (p,xn)-reactions on  $^{62}\text{Ni}$  and highly enriched  $^{62}\text{Ni}$ : possibility of production of medically important  $^{62}\text{Cu}$ ,** Radiochimica Acta, vol. 57, p.1-5, 1992.
- [4] PIRART, C., **Technologies relevant to commercial radioisotopes.** In, INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-ENERGETIC APPLICATIONS OF NUCLEAR SCIENCE-BRUSSELS, june 1-3, 1995, *Proceedings...* Brussels:BNS, 1995.
- [5] SONCK, M., VAN HOYWEGHEN, J. and HERMANNE, A., **Determination of the external beam energy of a variable energy, multiparticle cyclotron,** Applied Radiation and Isotopes, vol. 47(4), p. 445-449, 1996.
- [6] TÁRKÁNYI, F., SZELECSÉNYI, F. and KOPECKÝ, P., **Excitation functions of protons induced nuclear reactions on  $^{62}\text{Ni}$  for monitoring beam energy and**

intensity, International Journal of Applied Radiation and Isotopes, vol. 42, p.513-517, 1991.

[7] KOPECKÝ, P., SZELECSÉNYI, F., MOLNÁR, T., MIKECZ, P. and TÁRKÁNYI, F., **Excitation functions of (p,xn) reactions on  $^{64}\text{Ti}$ : monitoring of bombarding proton beams,** Applied Radiation and Isotopes, vol. 44(4), p.687-692, 1993.

[8] THE CYCLOTRON CORPORATION. **Instruction and Services Manual for the Cyclotron Corporation's - Model CV-28 Cyclotron - Ser. NO. 604.** US Pat. (TCC Ins - 26), nov. 12, 1976.

[9] WILLIAMSON, C.F., BOUJOT, J.P. and PICKARD, J., **Tables of range and stopping power of chemical elements for charged particles of energy 0.05 to 500 MeV,** Report CEA - R -3042, 1996.

#### ABSTRACT

The radioisotope production in cyclotrons can be severely affected by homogeneity of the beam during irradiation. When the beam isn't homogeneous, the mean power density doesn't correspond to the measured values in the different points of the target, resulting in regions with higher currents (hot spots). In this work the external beam of the CV-28 cyclotron at IPEN-CNEN/SP was characterized using monitor reactions in copper and the peaks, corresponding to the radioisotopes  $^{62}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Zn}$  and  $^{65}\text{Zn}$ , which are formed by proton irradiation, were analysed. The characterization consisted in a quantitative evaluation of the beam intensity distribution in the irradiated area and its corresponding incident energy.