

O SISTEMA DE ALVO INTERNO DO CÍCLOTRON CV-28 DO IPEN-CNEN/SP

Sumair Gouveia de Araujo, Valdir Sciani e Wanderley de Lima

IPEN-CNEN/SP
Caixa Postal 11049
05508-900, São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

O ciclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP se destina prioritariamente à produção de radionuclídeos para utilização em diagnóstico na medicina nuclear. Até o momento, as irradiações foram realizadas com feixes externos, cujo inconveniente é a limitação da corrente de feixe devido ao sistema de extração. Para atingir correntes de feixe maiores, o objetivo do presente trabalho foi o de modificar e otimizar o sistema de alvo interno do ciclotron CV-28, que possuía três falhas críticas no projeto, que inviabilizava sua utilização. Primeiro, o transporte do alvo até a posição de irradiação foi modificado de pneumático para acionamento com motor. Segundo, a refrigeração do alvo foi aumentada. Terceiro, considerado o mais grave, foi a modificação no sistema de trava do porta-alvo, que no sistema original saía de sua posição e caía dentro do tanque do ciclotron, levando o mesmo à pressão atmosférica. Em irradiações em alvos de Zinco natural com correntes de feixe de até 80 μA a perda de massa foi desprezível. O rendimento obtido de ^{67}Ga , no final da irradiação, foi de 21,2 MBq/ μAh (0,57 mCi/ μAh).

INTRODUÇÃO

O ciclotron CV-28 do tipo isócrona, compacto, de energia variável, instalado no IPEN-CNEN/SP[1], possui como características de projeto uma intensidade de feixe interno de 200 μA e externo de 60 μA , para prótons com energia de 24 MeV[2], além de acelerar dêuterons, $^3\text{He}^{++}$ e alfas, com energia máxima de 14, 36, e 28 MeV, respectivamente. Normalmente, pode-se fornecer um feixe externo com uma corrente máxima de 35-40 μA para prótons. Esta limitação é devida principalmente à tecnologia no sistema de extração (defletor) dos aceleradores de íons positivos, que acaba absorvendo a maior parte do feixe não extraído. Duas linhas de feixe externa estão disponíveis para irradiações principalmente de alvos sólidos, visando a obtenção dos seguintes radioisótopos: ^{67}Ga , ^{123}I , ^{111}In , ^{51}Cr e ^{57}Co . Na prática, no ciclotron do IPEN, em regime contínuo (nas irradiações de ^{68}Zn para a produção de ^{67}Ga), utilizou-se correntes de 25-30 μA no alvo durante 21 horas de irradiação, para uma produção em torno de 12.950 MBq (350 mCi) semanais. Em geral, estas intensidades de corrente são baixas para uma produção eficiente dos radioisótopos mais comuns em ciclotrons (^{67}Ga , ^{111}In), não conseguindo com esta corrente de feixe produzir quantidades suficientes para atender a classe médica, uma vez que a corrente e o tempo já estão no seu limite máximo. O primeiro devido ao sistema de extração e o segundo devido à meia vida do radioisótopo formado. Uma possível solução é a utilização de um

sistema de alvo interno, ou seja, de um sistema que permita a irradiação destes alvos sólidos com o feixe interno, onde a intensidade de corrente de feixe disponível não é mais uma limitação. Isto diminuiria significativamente os tempos de irradiação e, conseqüentemente, o desgaste da máquina. Com a aquisição do ciclotron, foi fornecido um sistema de irradiação com feixe interno. Entretanto, tal dispositivo não foi instalado e utilizado devido à ocorrência de grandes falhas com equipamento idêntico em diversos países e que levaram estas instituições a modificarem o projeto original[3,4,5]. Tendo em mente as vantagens que podem ser obtidas com a utilização de irradiações com feixe interno, o objetivo do presente trabalho foi modificar e otimizar este sistema de alvo interno, de tal modo que o alvo pudesse ser fixado firmemente e mantido com segurança no sistema de transporte para a posição de irradiação. Com isto, pretendeu-se alcançar uma operação confiável e constante de toda a seqüência lógica do sistema, desde a colocação do alvo, vácuo, transporte para a posição de irradiação, refrigeração, recuo do alvo e envio para a cela de desmontagem.

PARTE EXPERIMENTAL

O projeto original como um todo era viável e deveria ser aproveitado. Inicialmente o alvo era fixado em um porta-alvo e encaixado em um "coelho". Este conjunto era colocado numa estação na cela de manipulação. Um

soprador centrífugo transportava este conjunto até uma pré-câmara, através de um duto de 4" (101,6 mm) x 18 m. Um pistão auxiliar encaixava a haste do pistão principal no porta-alvo, estabelecendo-se as conexões de água de refrigeração do alvo, completando-se a selagem da pré-câmara para iniciar o vácuo. Feito o pré-vácuo, o sistema era aberto para a câmara principal do ciclotron, a qual já estava com alto vácuo, sendo então atingido o equilíbrio nos dois sistemas. Após isto, o pistão com o alvo seria avançado até a posição de irradiação. Para tal, o alvo (com o porta-alvo) sofria uma rotação de 90° em torno da haste do pistão principal, efetuado por meio de um guia mecânico. Uma vez completada a rotação, uma trava mecânica, composta por um pino situado na ponta da haste do pistão principal, encaixava numa canaleta dentro do porta-alvo. Esta trava garantia a diferença de pressão da água de refrigeração e do vácuo.

Uma vez terminada a irradiação, a retirada do alvo era feita em seqüência inversa: recuo da haste do pistão principal, desengate da haste do porta-alvo, envio do "coelho" mais porta-alvo para a cela de manipulação, para desmontagem do alvo. Nas duas extremidades do duto de um freio pneumático parava o "coelho" mais porta-alvo, amortecendo sua queda, já que a transferência era feita pneumaticamente e em alta velocidade.

Dentre as falhas no projeto original, três eram de vital importância para o seu bom funcionamento: a primeira era o transporte do alvo até a posição de irradiação, por um sistema pneumático; a segunda, considerada muito grave, era que durante o retorno do alvo após a irradiação, durante a rotação inversa de 90° para a posição vertical, o porta-alvo saía de sua posição na ponta da haste e caía, na saída do guia mecânico, pois a trava não atuava na posição vertical e a terceira falha no projeto original era a refrigeração, que demonstrou ser ineficiente. Os três pontos críticos estavam concentrados na fase compreendida entre o engate do pistão principal no porta-alvo, transporte para a posição de irradiação, irradiação em si, recuo e desengate do porta-alvo. Desta parte do sistema original, aproveitou-se simplesmente a "camisa" e a haste do pistão principal.

Assim, para se atingir a operacionalidade confiável e para que pudessem ser efetuadas as primeiras irradiações, foi necessário executar diversas etapas distintas, mas complementares, sendo as principais:

a) O controle do alvo foi feito de modo a permitir trabalhar nos modos manual e automático. No modo manual, cada operação exige comando para partida. Este só será aceito caso a operação precedente tenha sido completada. Já na operação automática, o processo é composto por uma lógica seqüencial, somando etapa por etapa, cada uma delas possuindo sensores de posição, que permite que uma determinada etapa somente possa ser iniciada se a anterior tiver sido completada, bastando o comando inicial. Para isto, foram instalados 16 sensores de posição, 2 a mais que o original;

b) modificação no sistema de transporte do alvo para a posição de irradiação, de pneumático para acionamento com motor, conforme mostrado na figura 1.

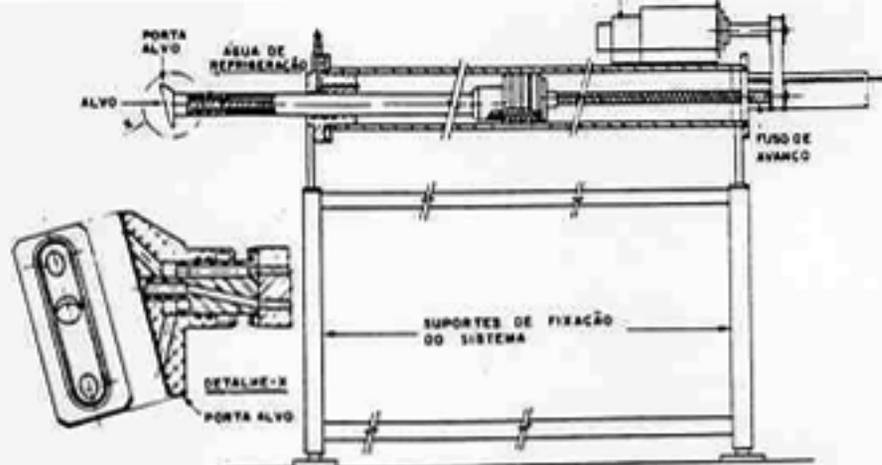


Figura 1. Sistema de transporte do alvo.

Para tal, utilizou-se apenas a "camisa" e a haste do pistão principal, sendo o transporte realizado através de um conjunto composto por fuso e transmissão a correia com motor. Isto garantiu um posicionamento preciso durante todo o transporte, proporcionando partidas suaves, podendo ser variada a velocidade de transporte de acordo com o passe do fuso ou a transmissão escolhida. A haste do pistão foi utilizada, pois ela possui diversas funções: transporte do alvo até a posição de irradiação, em sua parte interna está instalado os dutos que levam a água de refrigeração do alvo, possui acabamento fino de superfície e flanges convenientes para vácuo e é isolada eletricamente para medida de corrente de feixe.

c) mudança na capacidade de refrigeração do alvo. No sistema original, a água passava por um rebaixo feito no porta-alvo, cruzando toda a extensão do alvo. No sistema modificado, a água entra pela parte central do alvo e sai pelas extremidades, conforme já utilizado no sistema modificado por Lambrecht et. al. [3].

d) desenvolvimento de um sistema de trava do porta-alvo, para suportar a pressão de água de refrigeração, alto vácuo e a correta posição de irradiação. Um dos principais problemas consistia na queda do alvo no tanque principal ou na pré-câmara: esta queda ocorria quando do recuo do alvo, feito em vácuo, durante a rotação de 90°. Isto tornava seu uso inadequado, uma vez que o recuo somente era possível colocando-se todo o tanque do ciclotron na pressão atmosférica. A mudança neste mecanismo de trava foi de fundamental importância para a utilização deste sistema. Como solução, foi proposta uma modificação em toda a lógica do circuito de controle elétrico e mecânico, onde tanto no avanço como no recuo do pistão principal, a rotação do porta-alvo seria efetuada não em vácuo e sim à pressão atmosférica. Assim, primeiro girava-se o porta-alvo em aproximadamente 45°, ainda na pressão atmosférica, garantindo-se o travamento. Em seguida era feito pré-vácuo e aberto para o alto vácuo do tanque principal do ciclotron. Somente então completava-se a rotação de 90° e o avanço até a posição de irradiação. O recuo era feito de maneira análoga. Para tal, tornou-se necessária uma mudança na lógica do circuito, com a introdução de "fins de cursos" adicionais, que pudessem proporcionar estes "atrasos" de engates, de abertura de válvulas do tanque principal para a entrada de ar na pré-câmara, onde é feita a rotação final do porta-alvo. Isto é, modificação em todos os intertravamentos de controle do mesmo.

Seqüência de operação do sistema otimizado A seqüência de operação do sistema otimizado é descrita a seguir e pode ser melhor visualizado pelo esquema simplificado na figura 2.

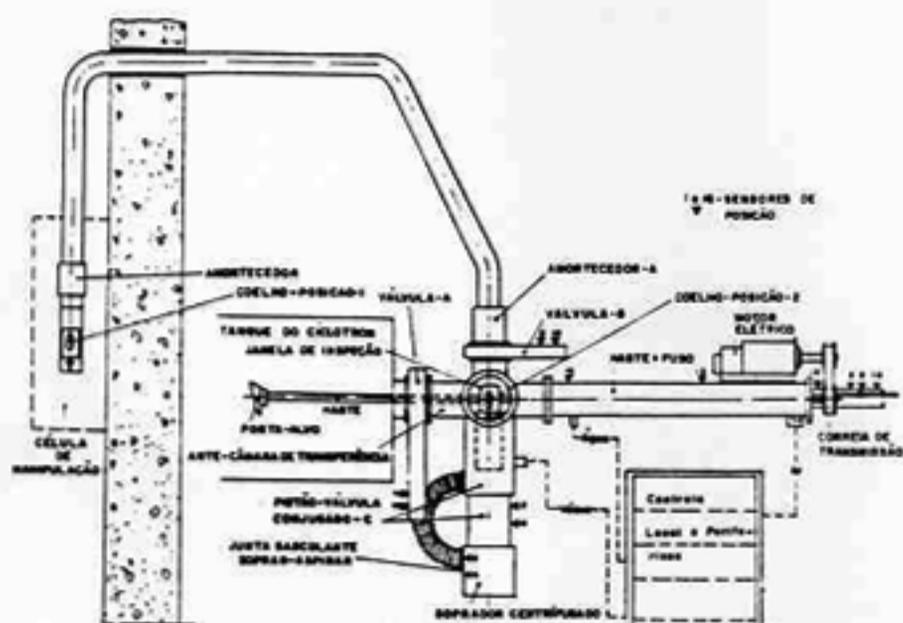


Figura 2. Esquema simplificado do sistema.

1) Inicialmente o "coelho" com o porta-alvo e alvo é inserido num alojamento na extremidade do duto de transporte, dentro da cela de manipulação, no laboratório de química quente, situado ao lado da caverna do ciclotron. O sensor 1 é acionado pelo peso do "coelho" com o porta-alvo, fornecendo uma das condicionantes para o início de operação. As demais condicionantes são: haste do pistão principal recuada; pistão válvula-conjugado C avançado; válvula A fechada; válvula B aberta; amortecedores A e B livres; refrigeração do alvo bloqueada; pré-vácuo desligado e sensor de vácuo - atmosfera.

2) Dada a partida, o processo se inicia conduzindo a junta basculante para a posição de aspirar, dependendo da situação dos sensores 1, 2, 3, ou 4.

3) O aspirador é acionado, o "coelho" é succionado e, ao liberar o sensor 1, o amortecedor A é acionado para reter o "coelho" após a travessia do duto. O coelho é retido pelo amortecedor e após um tempo programado (~10 s) é liberado, caindo por gravidade num alojamento no topo do conjugado pistão-válvula C, acionando o sensor 2. O aspirador é desligado. Na queda, o coelho sofre uma rotação, de forma a ficar corretamente orientado para a introdução da haste do pistão principal.

4) a seguir o motor é acionado até encaixar a haste do pistão principal no porta-alvo. Neste encaixe se estabelecem as conexões de água entre haste e porta-alvo. O sensor 5 é ativado indicando o engate.

5) O conjugado pistão - válvula C é recuado, fechando-se a comunicação com o aspirador e acionando duas garras que prendem o "coelho" e destravam o dispositivo de retenção do porta-alvo no "coelho". O sensor 8 é ativado, indicando porta-alvo livre e "coelho" preso.

6) A válvula B é fechada, completando-se a selagem da pré-câmara de vácuo, ativando o sensor 9.

7) O motor novamente é acionado e a haste do pistão principal é avançada, conduzindo apenas o porta-alvo para uma posição intermediária onde, neste ponto, o porta-alvo trava. Neste movimento, um guia mecânico (canaleta) produz uma rotação de 45° no porta-alvo, ao

redor da haste, acionando o sensor 15, assegurando, assim, o travamento do mesmo. Neste momento o sistema está preparado para ser evacuado.

8) A bomba de pré-vácuo é acionada e quando o vácuo atingir 10^{-2} Torr, é possível a abertura da válvula A, e também a refrigeração poderá ser ligada e desligada, apenas para verificar se não há vazamento de água.

9) A válvula A é aberta condicionando-se vácuo, permitindo assim o transporte do alvo para dentro do tanque principal do ciclotron via sensor 12.

10) A seguir, pela terceira vez, o motor é acionado e o pistão principal é avançado, completando-se a rotação de 90° no porta-alvo ao redor da haste, guiado através de um trilho, assegurando-se a orientação correta para irradiação.

11) Alcançada esta posição de irradiação, liga-se a água de refrigeração. O sensor 14 é ativado.

O alvo está pronto para ser irradiado e a medida da corrente de feixe é feita através do contato elétrico com a haste do pistão principal. O recuo é feita de maneira análoga.

Irradiações Efetuadas. Para análise do perfil do feixe incidente foram utilizadas chapas de cobre de 104 x 43 x 3 mm, nas quais foram feitos canais de 1,7 mm de profundidade, melhorando a capacidade de refrigeração, gerando turbulência da água e garantindo a resistência mecânica do material suporte. Testes de perfil também foram feitos, envolvendo a placa de cobre com uma lâmina fina de alumínio, que possuía a mesma finalidade da camada tinta.

Para simular as condições de utilização real em um regime de produção, foi eletrodepositado Zinco (~500 mg) em chapas idênticas de cobre, cobertas com camada de Níquel, em área de 10,4 cm², o que levava a espessura eletrodepositada de 45-50 mg/cm². Durante as irradiações foi acompanhada a temperatura da água na saída de refrigeração do porta-alvo em função da corrente de feixe, utilizando-se um termopar de NiCr-Ni. Após a irradiação foi verificada a eventual perda do material alvo e medido o rendimento de produção do radioisótopo obtido, para comparação com os resultados já conhecidos em irradiações efetuadas com Zinco, em linhas de feixe externo. Para o cálculo do rendimento, o alvo foi dissolvido em 30 ml de ácido clorídrico concentrado e diluído em 250 ml de água destilada. Aliquotas de 1ml foram retiradas e medidas em um detector de Ge(HP). As irradiações foram feitas com prótons de 24 MeV de energia e correntes de feixe até 80 µA, com ângulo de incidência de 1,45°.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Modificações no Sistema Original. Antes da utilização do sistema para irradiações de alvos, o primeiro resultado positivo que deveria ser esperado era em relação à operacionalidade e confiabilidade do sistema e isto somente seria possível se os três pontos críticos do projeto original fossem solucionados. A solução dada a cada um deles merece ser destacada, uma vez que se tornou o objetivo básico do trabalho e serão discutidos a seguir.

Sistema de Transporte do Alvo para a Posição de Irradiação. A modificação no sistema de transporte do alvo para a posição de irradiação, de pneumático para acionamento com motor, permitiu um ajuste fino, controlado e confiável, eliminando-se os pistões principal e secundário, além de válvulas eletro-pneumáticas que comandavam os mesmos. Assim, tanto o percurso para o engate da haste com o porta-alvo, bem como o transporte até a posição de irradiação, passaram a ser feitos por um único motor. O retorno até o desengate também.

A transmissão do motor para o fuso, bem como o passo do fuso, foram escolhidos de maneira a ter um engate e um transporte suave do porta-alvo. A velocidade de transporte foi de aproximadamente 6.10^{-3} m/s, sendo o percurso da posição de engate até a posição de irradiação de 1,42 m.

Durante o percurso de engate-transporte, irradiação e retorno, por seis vezes o motor deve ser ligado e desligado dependendo da etapa que está sendo executada. Para o controle deste motor foram utilizados relés de memória, cuja configuração com duas bobinas e trava mecânica em seus contatos permite que, uma vez dado o sinal pelo sensor de posição na sequência de operação, a primeira retém os contatos mecanicamente, que mantém esta sua posição retida independente de estar energizado ou não. Ela só se destravará a partir do momento que receber o sinal da segunda bobina, que só é acionada quando recebe o sinal do sensor de posição subsequente, que indica que a etapa foi completada, desligando o motor.

A utilização de relés de memória permitiu que fosse evitado qualquer problema de erro operacional ou qualquer problema devido à queda de energia durante a operação, recuperando a mesma posição na sequência lógica de operação, sem a necessidade de se reiniciar todo o processo como ocorria no sistema original da TCC.

Refrigeração do Alvo. Em testes preliminares realizados com o sistema original da TCC, para correntes maiores que $5 \mu\text{A}$ havia perda de material alvo percebida ainda durante a irradiação, através de oscilações no vácuo e faiscamentos no sistema de radio-frequência. O fluxo de água de refrigeração era de aproximadamente 6 L/min com uma pressão de 7 kgf/cm^2 . Com a modificação no porta-alvo, cuja entrada de água se fez pelo centro e saída pelas extremidades, rebaixamento no porta-alvo de 2 mm e as ranhuras na placa suporte, onde o alvo é eletrodepositado, o fluxo de água aumentou para 14 L/min, mantendo-se a mesma pressão de 7 kgf/cm^2 . Esta geometria permitiu o aumento da corrente de feixe para $80 \mu\text{A}$, sem perda de material alvo.

Sistema de Trava. O sistema de trava era um dos principais problemas do projeto original, pois o alvo caía no momento de saída do guia mecânico, quando da rotação inversa de 90° , feita ainda em alto vácuo, sendo que, nesta posição, a trava não atuava: o porta-alvo ficava somente preso na haste por dois "o-rings". Além disto, havia queda abrupta de vácuo, com vazamento de água de retorno da refrigeração, pela quebra da estanqueidade das válvulas solenóides e de retenção. A retirada do alvo exigia a abertura da câmara de vácuo do ciclotron, expondo o

peçoal técnico a altas doses de radiação. Para solucionar este problema e aproveitar o sistema de trava original, optou-se por alterar, não a trava em si, mas a lógica de controle, de tal maneira que a rotação de 90° fosse efetuada em duas etapas: uma na pressão atmosférica e outra em vácuo. Assim, ainda na pressão atmosférica, é efetuada uma rotação de aproximadamente 45° , onde, neste ponto, a trava mecânica já está atuando. Somente então é feito pré-vácuo, testa-se a água, abre-se a válvula do tanque do ciclotron e avança-se o porta-alvo até a posição de irradiação. A retirada é feita de maneira análoga: recua-se o porta-alvo até esta posição intermediária, com uma rotação inversa de 45° , fecha-se a válvula do tanque do ciclotron e coloca-se a pré-câmara, onde está o porta-alvo, na pressão atmosférica. Somente então é completada a rotação para a posição vertical puxando-se o porta-alvo até o "coelho".

Para a mudança na lógica de controle, de modo a se efetuar a rotação de 90° em duas etapas, foi necessária a colocação de um sensor de posição entre a posição de engate e a abertura da válvula alvo interno-ciclotron. Como dentro da pré-câmara não havia espaço disponível para a introdução de qualquer tipo de sensor, o mesmo foi instalado na flange externa que apóia a haste do pistão, consistindo de um cursor, que representasse a distância percorrida pela haste. Assim, com a colocação deste sensor intermediário, na rotação de 45° , que indicava o final desta etapa, a sequência lógica de operação tornou-se mais segura e confiável, pois:

a) evita qualquer dano ao ciclotron, já que as operações, que no sistema original eram de risco, são feitas com a válvula do tanque principal fechada;

b) com esta modificação tanto o início do vácuo quanto o retorno à pressão atmosférica são feitos com a trava mecânica atuante;

c) quando o porta alvo está livre, isto é, na posição vertical onde a trava mecânica não atua, a pré-câmara sempre estará em pressão atmosférica, sem diferença de pressão do tipo vácuo, água de refrigeração ou de ar comprimido de purga;

d) esta parada intermediária em 45° , com o sistema já travado e com pré-vácuo, possibilitou fazer teste de água de refrigeração e a purga da água, antes de abrir a válvula do tanque principal. No sistema, estas duas operações só eram permitidas com o alvo em posição de irradiação, qualquer eventual vazamento ocorreria na região central do ciclotron, o que implicaria em quebrar o vácuo, abrir o tanque, aspirar esta água e fazer novamente vácuo, para a retirada de toda umidade do sistema. Isto poderia causar atraso ou cancelamento de outras produções.

Irradiações. Para os primeiros ajustes no perfil de feixe, as irradiações eram efetuadas com baixas correntes de feixe, no máximo $1 \mu\text{A}$, e visualizado pela volatilização da tinta ou pelo corte da lâmina de alumínio presa na parte frontal do alvo. Estas formas de visualização do local de incidência do feixe, na placa de cobre "marcada", foi usada como referência para os ajustes posteriores no perfil de feixe, através das bobinas de correção dos campos magnéticos principal e harmônicos. O feixe ideal otimizado era um compromisso em sua posição de

marcação na chapa de cobre e a intensidade da corrente incidente, onde abrangesse a maior área do material que seria eletrodepositado como alvo. Uma vez o feixe otimizado com correntes de feixe baixas, placas de cobre niqueladas foram utilizadas para ajustes de perfil, com valores cada vez maiores, sendo a marcação na chapa notada pela escurecimento do níquel no local de incidência do feixe.

Temperatura da água de refrigeração na saída do porta-alvo. Para refrigeração do alvo foi utilizada água desmineralizada do circuito primário, que refrigera o ciclotron, a qual se mantém em torno de 13°C. A figura 3 mostra a temperatura da água de refrigeração na saída do porta-alvo em função da corrente de feixe. A corrente de feixe foi aumentada de 5 em 5 μA . Nota-se que para um aumento de 5 μA existe um aumento de 1°C na temperatura da água na saída.

Quando se manteve a corrente de feixe em um determinado valor, após grandes variações, por exemplo de 60 para 40 μA , rapidamente a temperatura se fixava no valor correspondente, sendo reprodutivo, tanto no aumento como no decréscimo do feixe.

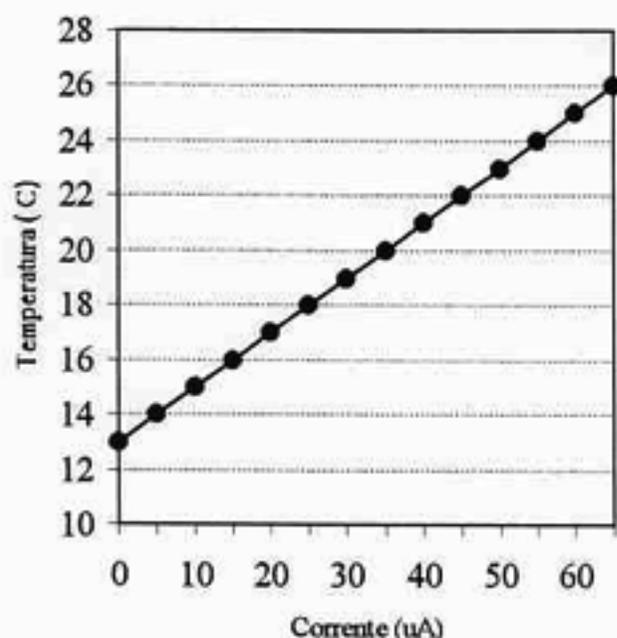


Figura 3 - Temperatura da água de saída da refrigeração ($^{\circ}\text{C}$) em função da corrente de feixe (μA).

Irradiações em alvo de Zinco Natural Uma vez estabelecidos os parâmetros do ciclotron para obtenção de um ótimo perfil de feixe, irradiações em alvos eletrodepositados com Zinco natural foram feitas com o intuito de verificar a máxima corrente de feixe que pudesse ser utilizada no sistema de alvo interno, de maneira a não perder material alvo por volatilização e verificar o rendimento do radioisótopo obtido, comparado a valores já conhecidos em irradiações com feixe externo.

Assim, foram feitas irradiações de 1 hora com correntes de feixe a partir de 20 μA , sendo medida a massa dos alvos após a irradiação. Nestas irradiações, para correntes de até 80 μA , a perda de massa do alvo foi desprezível,

Assim, mantendo-se a corrente entre 60 e 70 μA , que correspondem a mais do dobro da utilizada em feixe

externo, irradiações mais longas foram efetuadas com o intuito de verificar a perda de massa e o rendimento de ^{67}Ga obtido a partir de alvo de Zinco natural. A tabela 1 mostra os parâmetros destas irradiações.

Além disto, a temperatura de saída da água do alvo permaneceu constante, após a estabilização, durante toda a irradiação. Por exemplo, na irradiação mais significativa, 230 min, a temperatura inicial era de 12°C e permaneceu constante em uma temperatura de 24°C em toda a irradiação.

TABELA 1 - Irradiações feitas em alvos de Zinco natural com correntes mantidas constantes, como em produções rotineiras.

Tempo (min)	Corrente média (μA)	Dose ($\mu\text{A.h}$)
75	72,0	90
120	61,5	123
230	67,7	262

Na figura 4 pode ser vista a carga acumulada em função do tempo desta irradiação, medida em intervalos de 30 min. Nota-se que, a dose aumenta linearmente com o tempo, demonstrando que a corrente não sofreu oscilações durante a irradiação.

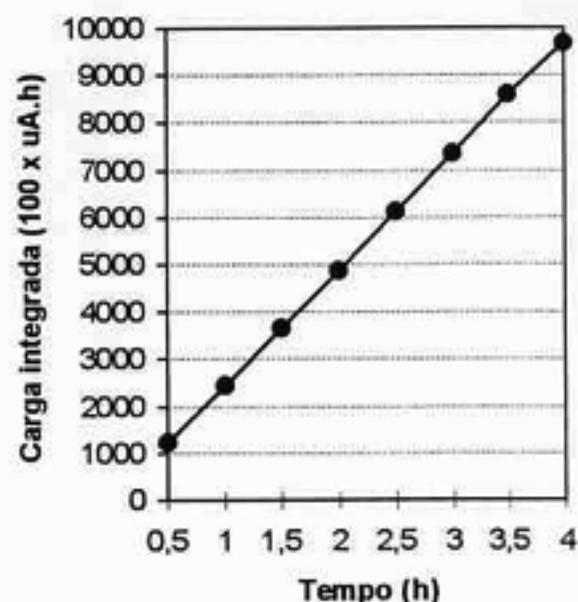


Figura 4 - Carga acumulada durante a irradiação.

Isto mostra que, a utilização do sistema de alvo interno, o qual possibilita irradiações com correntes de feixe maiores, possui uma estabilidade muito boa, ao contrário do alvo externo, que depende da estabilidade do defletor. Além disto, o rendimento obtido do ^{67}Ga , no final da irradiação foi de 21,2 $\text{MBq}/\mu\text{Ah}$ (0,57 $\text{mCi}/\mu\text{Ah}$), valor compatível com o obtido no ciclotron CV-28, utilizando-se irradiações em feixe externo e correntes de 10 μA por uma hora, de 23 $\text{MBq}/\mu\text{Ah}$ (0,62 $\text{mCi}/\mu\text{Ah}$) [6].

No caso de alvos sólidos, em ciclotrons de íons positivos, como o do IPEN-CNEN/SP, devido ao problema do sistema de deflexão, o alvo interno é a saída mais razoável para a utilização de altas correntes de feixe, sendo

uma das desvantagens deste sistema a não desfocalização do feixe.

Uma outra alternativa seria a utilização de um ciclotron que acelera íons negativos, H^- , com funcionamento similar de uma máquina clássica padrão de íons positivos (magneto principal, R.F, etc), diferenciando no sistema de extração, que pode-se obter uma eficiência próxima de 100%, por meio de uma folha de carbono fina. Neste caso, pode-se obter correntes de feixe externo acima de 200 μA , inclusive com a possibilidade de extração de 2 feixes simultaneamente.

Deve ser ressaltado que, além de prótons o ciclotron CV-28 pode acelerar outras partículas (dêuterons, $^3He^{++}$ e alfas) as quais podem ser utilizadas com o sistema de alvo interno.

CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que as modificações no projeto original do alvo interno, como, por exemplo, posicionamento com motor, aumento na capacidade de refrigeração, desenvolvimento no sistema de trava, alterações na lógica de comando, etc, tornaram o sistema mais versátil e muito mais confiável que o sistema de alvo interno de acionamento pneumático fornecido pela TCC. Um painel de controle adicional, localizado na sala de controle do ciclotron, permite operação do sistema completamente automática e remota, uma vez que o alvo possui uma taxa de exposição alta: em irradiações com 80 μA durante quatro horas, em Zinco natural, esta ultrapassou 1000 R/h.

A temperatura de saída da água de refrigeração do alvo aumentou linearmente com a corrente do feixe de prótons, aumentando de 13 °C para 25 °C com uma corrente de 60 μA . Para correntes de feixe de 80 μA , em irradiações de 2 horas em Zinco natural a perda de massa do alvo foi desprezível, mostrando que o aumento de refrigeração do alvo foi eficiente.

Assim, considerando que as irradiações com feixe externo eram efetuadas com correntes de feixe de 25 μA a 30 μA , durante um período de aproximadamente 18 horas para a produção do ^{67}Ga , a utilização do sistema de alvo interno contribuiria na redução deste tempo de irradiação para mais que a metade do utilizado, refletindo diretamente na diminuição do desgaste do acelerador e/ou sua utilização para outras finalidades.

Embora a utilização de aceleradores de íons negativos seja uma tendência atual na produção comercial de radioisótopos, o sistema de alvo interno torna-se uma solução conveniente para irradiações com altas correntes de feixe no ciclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP, além de ser um ciclotron que pode acelerar outras partículas além de prótons.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARAUJO, S.G.; SCIANI, V.; SAMPA, M. H. O.; LIMA, W.; RELA, P. R. *Ciclotron do IPEN-CNEN/SP -*

atividades recentes. In: III ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, Agosto 7-11, 1995, Águas de Lindóia. *Proceedings...* Águas de Lindóia, ABEN, 1995. p. 859 - 863.

[2] THE CYCLOTRON CORPORATION. *Instruction and Service Manual for the Cyclotron Corporation's - Model CV-28 Cyclotron - Ser. N0. 604.* US Pat. (TCC Ins-26), nov. 12, 1976.

[3] LAMBRECHT, R.M.; SAJJAD, M.; SYED, R. H.; MEYER, W. *Target preparation and recovery of enriched isotopes for medical radionuclide production.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. A282, p.296-300, 1989.

[4] STELLMACHER, W. ; KOGLER, W. ; CREMER, H. ; BOLTEN, W. ; BLESSING, G. *An automatic target system for high current irradiations in the internal beam of a compact cyclotron.* Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals, vol. XIX, n. 11-12, p.1355-1357, 1982.

[5] PIRART, G., BOL, J.L., LANNOYE, G., RENWART, D. *Development of a high intensity internal target at the IRE cyclotron.* Revue IRE Tijdschrift, vol. 12, n.3, p.2-6, 1988.

[6] SANTOS, E. E.; *Estudos da Separação de Ga e Zn, por meio de Resinas Trocadoras e de Adsorção de Íons. Obtenção de ^{67}Ga para Uso em Medicina Nuclear.* São Paulo: 1995. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas 12, 1982.

ABSTRACT

The CV-28 Cyclotron at IPEN-CNEN/SP is used mainly for radioisotope production to be utilized in nuclear medicine for diagnostic purposes. Up to now, the irradiations were performed in the external beam line, which has limitations in beam current due to the extraction system. To achieve high beam currents, the objective of this work was to modify and improve the internal target system of the CV-28 Cyclotron, which had three critical points in the original project, that made the system useless. First, the transport of the target to the irradiation position was modified: the pneumatic tube was changed to a motor drive service. Secondly, the target cooling system was improved. Third and the most critical, the modification on the locking system of the target holder that could bring the cyclotron tank to atmosphere. The loss of mass in natural Zn targets irradiated with currents up to 80 μA was negligible. The production yield of ^{67}Ga obtained, at EOB, was 21.2 MBq/ μAh (0.57 mCi/ μAh).