

CÍCLOTRON PARA PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE RADIOISÓTOPOS - CARACTERÍSTICAS RELEVANTES

Wanderley de Lima

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

RESUMO

A produção industrial de radioisótopos requer ciclotrons com manutenção simplificada, de alta produtividade e custos de operação reduzidos. Para se obter tais qualidades, os especialistas do setor conseguiram progressos fantásticos, valendo-se dos modernos recursos de cálculo e simulação. A simples exploração máxima do conceito físico de variação azimutal do campo magnético, surgida em 1967 com os ciclotrons isócronos, permitiu a construção de ciclotrons com consumo de energia de apenas 30% dos anteriores. Por outro lado, a aceleração de íons negativos possibilitou o aproveitamento de 100% do feixe acelerado, sem dissipação interna de energia, obtendo-se intensidades externas de até 1mA em regime contínuo, representando um fator 15 de aumento. Outras variáveis foram otimizadas visando a confiabilidade e a redução da ativação de componentes. Em termos de consumo de energia e intensidade de feixe fornecido, um ciclotron atual de 30MeV e 300 μ A de corrente de prótons é 15 vezes mais eficiente que seu antecessor.

I. INTRODUÇÃO

O consumo comercial de radioisótopos tem crescido regularmente, impulsionado pelos progressos na medicina nuclear, nos equipamentos imageadores para diagnóstico e nas técnicas de produção, tanto por ciclotrons quanto por reatores nucleares.

A produção por ciclotrons, na verdade, assumiu características industriais na última década, quando se configurou o elenco de radioisótopos de maior interesse (Tabela 1), cuja produção requer apenas prótons com energia entre 15MeV e 30MeV. Isto conduziu a um esforço na otimização de ciclotrons para operação com prótons nesta faixa de energia e com elevada intensidade de feixe (500 μ A)^[1, 2, 3].

II. INOVAÇÕES INTRODUZIDAS

1. Estrutura Magnética. O período de revolução dos íons acelerados no ciclotron (Equação 1) necessita ser constante, para sincronismo com o campo dos eletrodos de aceleração dos íons (DEES). Isto requer que o campo magnético aumente radialmente, pois a massa m aumenta com a velocidade^[4].

$$T = (2 \pi m) / q B \quad (1)$$

onde: T = período,
 q = carga do íon,
 m = massa do íon,
 B = campo magnético.

Entretanto, se o campo cresce radialmente, surgem forças perpendiculares ao plano da órbita, que tiram a partícula do plano de aceleração, o que chamamos de desfocalização. Os primeiros ciclotrons tinham um campo decrescente com o raio, o que implicava na perda gradual do sincronismo. A energia final estava limitada, pois após uma dezena de órbitas, o sincronismo estava comprometido.

TABELA 1. Radioisótopos mais Comuns Produzidos por Ciclotron, para Uso Médico

Radioisótopo	Reação	Meia Vida
Tálio	$^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$ $^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	73,5h
Gálio	$^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$	78,3h
Iodo	$^{124}\text{Xe}(p,2n)^{123}\text{Cs}$ $^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow$ ^{123}I	13,2h
Índio	$^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$	67,2h
Bromo	$^{78}\text{Kr}(p,2n)^{77}\text{Rb}$ $^{77}\text{Rb} \rightarrow ^{77}\text{Kr} \rightarrow ^{77}\text{Br}$	57h
Flúor	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$	109,6min

Na década de sessenta constatou-se que, se o campo magnético ao longo de uma órbita fosse variável (variação azimutal), com seu valor médio na órbita satisfazendo a equação 1, então poderíamos ter campo médio crescente com o raio, assegurando sincronismo, pois os gradientes azimutais do campo produziam outras forças de focalização das partículas no plano de aceleração, que superavam as forças desfocalizadoras devido ao aumento do campo médio na direção radial.

Surgiram então os ciclotrons isócronos compactos sem limitação quanto ao número de órbitas de aceleração e, portanto, de maior energia final.

A variação azimutal do campo é obtida por colocação de calços nas peças polares, chamados "setores", produzindo uma variação azimutal do entreferro ("gap") entre as peças polares, ou seja, regiões de "gap" estreitos ("hills"), de elevado campo magnético e regiões de "gap" largos ("valleys"), com campo magnético reduzido.

Nos ciclotrons novos, o "gap" foi reduzido ao máximo (30mm nos "hills"), tornando os "valleys" profundos, a ponto de permitir a inserção total dos DEES nos "valleys" e ainda bem afastados da estrutura polar, resultando em:

(A) Baixa capacitância nos DEES e, portanto, menor "consumo" de energia em Rádio Frequência;

(B) Baixa corrente nas bobinas de campo, devido ao "gap" reduzido nos "hills".

Para se instalar os DEES nos "valleys" foi necessário se projetar a estrutura magnética com quatro setores gerando-se "valleys" opostos em 180°, para inserção dos DEES.

Nesta configuração magnética as trajetórias de aceleração não são circulares, mas quadrangulares, conforme ilustrado na Figura 1, pois ocorre forte deflexão nos "hills" enquanto que nos "valleys" a trajetória é quase retilínea.

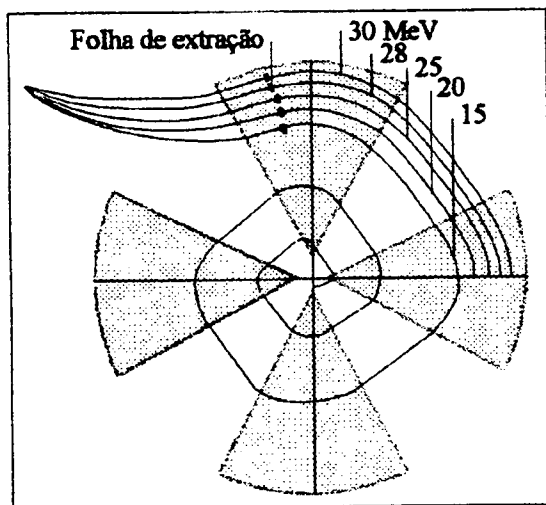


Figura 1. Trajetórias de Extração dos Prótons

2. Aceleração de Íons Negativos e Extração por Inversão de Carga. Em 1970, a TCC (The Cyclotron Corporation) se propôs a construir um ciclotron para acelerar partículas H^- onde as vantagens, hoje realidade, eram convincentes. Cinco máquinas, foram encomendadas mesmo antes da construção do protótipo final. Entretanto, o esforço para se colocar tais máquinas denominadas CP42 (energia máxima 42MeV) em regime operacional de alta confiabilidade, contribuiu para falência da TCC, apesar de que quatro delas funcionam em produção regular até hoje e a quinta foi instalada na Argentina em 1994, após readequação de alguns componentes na Alemanha.

Em todos os aceleradores circulares, um dos problemas mais difíceis é a extração do feixe de íons após a aceleração, pois as sucessivas órbitas com diferentes energias são muito próximas umas das outras, requerendo canais de desvio excitados por campos elétricos e magnéticos auxiliares que conduzem os íons para fora do campo magnético principal, o qual é responsável pelas órbitas circulares.

Difícilmente se obtém extração com eficiência acima de 75%, havendo redução desta eficiência quando se aumenta a corrente de feixe. Para a ciência básica, correntes de décimos de μA são satisfatórias. Entretanto, para produção de radioisótopos são empregadas correntes de $10\mu A$ a $150\mu A$ com feixe simples e de até $300\mu A$ com feixe duplo. Todos os íons não extraídos chocam-se com partes internas do acelerador, provocando desgaste e ativação nuclear, tornando a manutenção complexa pela alta taxa de dose emanada dos componentes.

A aceleração de íons negativos de hidrogênio H^- oferece uma solução perfeita para tais problemas, pois, passando-se o feixe de H^- acelerado por uma folha fina (geralmente carbono) nada acontece com os prótons, mas, os dois elétrons são removidos do H^- , transformando-o em H^+ .

O H^+ no campo magnético principal do ciclotron curva-se imediatamente na direção oposta do H^- , ou seja, para fora do ciclotron, fornecendo facilmente extração com 100% de eficiência.

Entretanto, como tudo tem aspectos positivos e negativos, o segundo elétron do H^- tem energia de ligação de apenas 0,755eV, podendo ocorrer dissociação por choque com moléculas de gás residual na câmara de vácuo do ciclotron, resultando em um átomo (neutro) de hidrogênio, que caminha em linha reta, chocando-se com a parede da câmara de vácuo, causando aquecimento e ativação das peças do ciclotron. Para superar tal limitação os ciclotrons de íons negativos devem operar com vácuo de pelo menos uma ordem de grandeza (10^{-7} torr) melhor que os ciclotrons de íons positivos, empregando, em geral, bombas do tipo criogênica ("crio-pump").

Por outro lado, se o H^- for acelerado até atingir energias relativísticas, a transformação de Lorentz do campo magnético principal do ciclotron produz um campo elétrico no sistema de referência do íon. Portanto, à medida que o campo magnético principal do ciclotron aumenta, cresce a probabilidade de dissociação do H^- se este está

relativístico. Isto impõe limites superiores na energia de ciclotrons com íons negativos. Estima-se ser possível a construção de ciclotrons com íons negativos de até 80MeV, sem grande comprometimento nas dimensões da máquina.

3. Variação da Energia sem Mudança dos Parâmetros Elétricos e Magnéticos. Como o ponto de extração dos prótons é definido pela posição da folha de extração, a energia pode ser alterada movimentando-se radialmente a folha. Com isto, a energia é alterada de 15MeV a 30MeV sem alterar a frequência dos DEES ou o campo magnético. Na verdade, é como se o raio do ciclotron fosse alterado.

Conforme se observa na Figura 1, todas as trajetórias de extração de 15MeV a 30MeV convergem para um ponto comum de saída do feixe. Isto é obtido com o emprego de um único eletroímã auxiliar, de campo ajustável.

Para mudança de energia do feixe, alteram-se apenas a posição da folha de extração e a corrente no eletroímã auxiliar. Isto representa enorme simplicidade operacional comparada ao ciclotron de íons positivos, onde o raio de extração é o mesmo para qualquer energia, exigindo modelagem do campo magnético em função do raio e correspondente alteração da frequência de excitação dos "DEES". Ajustes conjugados em quatro ou mais bobinas de campo são necessários nos ciclotrons convencionais.

Além da simplicidade, a estabilidade operacional foi muito acentuada, pois campo e frequência constantes, aliados a uma adequada conformação das peças polares, possibilitam:

- Bobina de campo única com corrente constante;
- Oscilador de R.F. com sintonia a quartzo;
- Acoplamento capacitivo fixo entre o oscilador e os "DEES",

resultando numa somatória de atributos positivos em componentes básicos quanto ao aspecto de estabilidade na aceleração dos prótons.

4. Produção de dois feixes simultâneos. Devido à simplicidade do sistema de extração dos prótons, podem-se obter dois feixes externos, interceptando-se parcialmente o feixe interno em dois pontos opostos da órbita. Como as energias destes feixes podem ser ajustadas independentemente, é possível a produção simultânea de dois radioisótopos distintos, mesmo que estes necessitem de energias diferentes.

Tal possibilidade é relevante pelo ganho de eficiência na produção e redução dos custos de distribuição aos hospitais. Por outro lado, na irradiação de materiais sensíveis ao aquecimento pela potência do feixe, podem-se empregar dois alvos com a intensidade máxima que cada alvo suporta, duplicando a taxa de produção. O mesmo procedimento pode ser empregado para reduzir pela metade o tempo de irradiação, caso ocorra produção de contaminantes nas reações nucleares induzidas ao longo da irradiação.

5. Consumo de energia. As inovações no projeto da estrutura magnética, mencionadas no item 1 (A) e (B), permitiram acentuada redução no consumo elétrico. A tabela 2 compara o consumo de um ciclotron de íons positivos (CV-28 de 24MeV - 60μA) com um de íons negativos (Cyclone 30, de 30MeV - 350μA).

TABELA 2. Potência Consumida ^(5,6)

Sistema	CV-28	Cyclone-30
Sistema de R.F.	70kW	30kW
Campo Magnético	70kW	10kW
Sistema de Refrigeração	140kW	25kW
Vácuo e Transporte de feixe	25kW 1 linha de feixe	40kW 2 linhas de feixe
Outros Periféricos	10kW	5kW
Total	315kW	110kW

O grande benefício desta redução recaiu sobre as fontes de alimentação, que se tornaram mais simples e compactas. Note-se a acentuada redução na carga de refrigeração, resultado dos ganhos na eficiência elétrica e na extração do feixe.

6. Segurança radiológica. A extração por inversão de carga eliminou um conjunto de peças (sistema de deflexão) que se tornava fortemente ativado e sujeito à degradação acelerada, requerendo reposição. Tal sistema, por espalhamento da radiação, contaminava ainda outros componentes e a própria câmara de vácuo do ciclotron.

Os trabalhos de manutenção acarretavam exposição à radiação, exigindo rotatividade do pessoal e/ou longo tempo de espera para intervenção, a fim de não superar os limites de dose.

Outro aspecto positivo é a geometria circular do núcleo ferromagnético dos novos ciclotrons, envolvendo completamente a câmara de aceleração e constituindo-se assim numa auto - blindagem à radiação gerada por perda de íons durante a aceleração.

III. CONCLUSÃO

Os aspectos técnicos relatados evidenciam o conjunto de fatores que permitiram considerável ganho de produtividade com reduzida manutenção e incremento da segurança radiológica.

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP adquiriu um ciclotron de íons negativos, modelo Cyclone - 30, produzido pela "Ion Beam Applications", da Bélgica, que substituirá seu antigo ciclotron CV-28, produzido na década de 70 pela "The Cyclotron Corporation", dos Estados Unidos da América.

O antigo acelerador será mantido em operação para uso em pesquisa básica e astrofísica nuclear.

As atividades de construção e instalação estão em andamento, com previsão de operação rotineira para o segundo semestre de 1998.

REFERÊNCIAS

- [1] MILTON, B. F., **Comercial Compact Cyclotron in the 90's**, 14th International Conference on Cyclotrons and their Application, Cape Town, October 8-13, CONF-951039-4, TRI-PP-95-76, 1-8, Sept 1995.
- [2] JONGEN, Y. and RYCKEWAERT, G., **Preliminary Design for a 30MeV, 500 μ A H⁻ Cyclotron**, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-32, 2703, 1985.
- [3] MILTON, B. F., et al., **Commissioning and First Operation of a 500 μ A, 30MeV H⁻ Cyclotron: The TR30**, Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference, San Francisco, 65, 1991.
- [4] LIVINGOOD, J. J. **Principles of Cyclic Particle Accelerators**. Argonne National Laboratory, Princeton, N. J., 1961.
- [5] THE CYCLOTRON CORPORATION - TCC. **Manual of Operation**, 1974.
- [6] ION BEAM APPLICATION - IBA. **Manual of Operation**, 1977.

ABSTRACT

The industrial production of radioisotopes requests cyclotrons with easy maintenance services, high productivity and low operation costs. To obtain this performance the experts on the field have achieved excellent results, taking advantage of modern resources in calculation and modeling. Only by the maximum exploitation of the azimuthal variation of the magnetic field, a physical concept introduced in 1967 with the isochronous cyclotrons, it was possible to construct cyclotrons with only 30% of the electrical consumption required by the former cyclotrons. On the other hand, the acceleration of negative ions enabled the 100% accelerated beam utilization, without internal energy dissipation, obtaining beam intensities up to 1mA in continuous running, which represents an increased factor of 15. Other construction parameters were optimized aiming at reliability and reduction in the components activation. Concerning energy consumption and the beam intensity supplied, a present cyclotron with 30MeV and 300 μ A of protons current is 15 times more efficient than its precedent.