



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

RT-IEN- 08/2010

PROGRAMA DE MELHORIAS TÉCNICAS APLICADAS AO  
ACELERADOR RDS-111 DO IEN - GRADE HEXAGONAL DO  
PORTA-ALVO - PARTE I

por

César Marques Salgado, Robson Ramos e Anízio Marques Garrido  
Filho

12/2010

NOTA  
ESTE RELATÓRIO É PARA USO EXCLUSIVO DO INSTITUTO DE  
ENGENHARIA NUCLEAR

O direito a utilização de informações relacionadas ao trabalho de pesquisa realizado no IEN é limitado aos servidores da CNEN e pessoal de organizações associadas, nos limites dos termos contratuais que regem os respectivos convênios. O conteúdo dos relatórios não pode ser separado ou copiado sem autorização escrita do IEN.



Título: PROGRAMA DE MELHORIAS TÉCNICAS APLICADAS AO ACELERADOR RDS-111 DO IEN - GRADE HEXAGONAL DO PORTA-ALVO – PARTE I				
Autor(es): César Marques Salgado, Robson Ramos e Anízio Marques Garrido Filho			e-mail: otero@ien.gov.br; robson@ien.gov.br; anízio@ien.gov.br.	
Identificação:	Nº de páginas: 04	Tipo de Divulgação: Irrestrita (X) Restrita ( )	Divulgar para:	Localização:
Publicação externa associada (congresso/periódico):				
Palavras chave: Flúor-18; Aceleradores de partículas; RDS-111; Porta-alvo <sup>18</sup> O				
Resumo: <p>Muitas peças utilizadas no acelerador de partículas RDS-111<sup>RD</sup> do Instituto de Engenharia Nuclear não estão disponíveis no mercado brasileiro e, portanto, quando necessárias, devem ser importadas. Nem sempre é possível manter em estoque a quantidade necessária de peças sobressalentes, devido principalmente à restrições/previsões orçamentárias. Há ainda, outros problemas relacionados com o processo de importação, tais como: o tempo gasto desde o início do pedido da compra até a chegada das peças e o alto custo das mesmas. Além disto, geralmente, as peças só são vendidas pelo próprio fabricante do acelerador que não tem obrigações legais de manter a continuidade de fabricação delas. Como o RDS-111<sup>RD</sup> produz o radioisótopo <sup>18</sup>F, e a partir de um processo de síntese o [<sup>18</sup>F]FDG, que é utilizado em exames médicos, o seu tempo de “parada” para manutenções deve ser minimizado. Estudos vêm sendo realizados na tentativa de nacionalizar a fabricação de algumas peças e aperfeiçoá-las, principalmente aquelas que se mostram mais críticas do ponto de vista da sua importância dentro do sistema, ou devido à frequência com que apresentam problemas (desgastes). Neste trabalho, apresentamos a “grade hexagonal de cobre” que foi desenvolvida no IEN/CNEN, e que é utilizada no suporte e refrigeração da janela do porta-alvo. É ela que cria a infra-estrutura, que permite a essa janela fazer a contenção do altamente pressurizado alvo de água enriquecida em <sup>18</sup>O.</p>				
Abstract: <p>Many parts of the of the Nuclear Engineering Institute’s cyclotron, RDS-111<sup>RD</sup>, are not available for sale in Brazil, therefore, when necessary, they must be imported. It is not always possible to keep enough spare parts in stock, mainly due to budget reasons. There are also other technical problems related to the import process, such as: the time required from the beginning of the purchase until the arrival of the desired parts and the high cost involved. Moreover, many parts are sold only by the original equipment manufacturer of the accelerator which might be discontinued for some reason. This accelerator is dedicated to the production of the radioisotope fluorine-18 that is incorporated into compounds normally used for diagnostic in nuclear medicine, such as glucose ([<sup>18</sup>F]FDG); therefore the repair time must be minimized. Studies have been conducted on the attempt to manufacture some parts that need to be replaced periodically, among them the copper hexagonal support grid (presented here) which is used to seal the high-pressure <sup>18</sup>O enriched water target.</p>				
Emissão Data:		Nome César M. Salgado; Robson Ramos, Anízio M. G. Filho	Rubrica	Data
Divisão: DIRA	Elaboração:			
Serviço: SECIC	Revisão:	Ubirajara Maribondo Vinagre Filho		
	Aprovação:	Miguel Ângelo V. Bastos		
Instituto de Engenharia Nuclear: Rua Hélio de Almeida, 75, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, CEP 21941-906, Rio de Janeiro – RJ - Brasil. Tel.: 00 55 21 2173-3700 Internet: www.iem.gov.br				

## 1 - Introdução

Radioisótopos produzidos em aceleradores cíclicos (ciclotron) e seus correspondentes radiofármacos têm-se mostrado extremamente valiosos na pesquisa médica básica, diagnóstico de doenças e tratamento radioterápico. O Flúor-18 ( $T_{1/2} = 109,7$  minutos) é um importante radionuclídeo emissor de pósitron que tem-se mostrado muito útil e até essencial, na obtenção das imagens de alta qualidade produzidas pelos tomógrafos por emissão de pósitrons (PET). Esta tecnologia tem permitido melhorias na visualização dos órgãos do corpo humano, conduzindo a diagnósticos mais precoces e precisos de doenças como por exemplo, o câncer.

Injetado na corrente sanguínea do paciente, o radiofármaco  $^{18}\text{F}$ -fluordesoxiglicose ( $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ ) (obtido a partir do radioisótopo  $^{18}\text{F}$  por um processo de síntese) desloca-se rapidamente aos locais onde há maior consumo de glicose (o principal alimento do tumor) mostrando de modo precoce a presença de células tumorais nas imagens.

Este radiofármaco pode ser utilizado também na neurologia, para identificar focos responsáveis pela ocorrência de epilepsia, e na cardiologia, em que é possível identificar se um músculo que “infartou” ainda possui células ou fibras miocárdicas “viáveis”, ou seja, que estão metabolizando a glicose e, portanto, estão vivas<sup>1</sup>.

A preparação do paciente segue paralelamente ao processo produtivo do radiofármaco  $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ , pois com a chegada deste ao hospital/clínica o paciente já deve estar preparado para receber uma dose deste radiofármaco, aguardar o tempo de absorção que o protocolo estabelece, e ser encaminhado para realização da tomografia por emissão de pósitrons (PET).

A produção de  $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$  no IEN ocorre nos aceleradores CV-28 e principalmente no RDS-111<sup>RD</sup> (CTI, Knoxville, TN, agora Siemens Medical Solutions). Este acelerador é compacto e acelera íons negativos ( $\text{H}^-$ ) até a

energia de 11 MeV. Ele possibilita a opção de extração em feixe duplo<sup>2</sup>, o que permite a produção simultânea, em 2 alvos, aumentando o rendimento de produção do radioisótopo  $^{18}\text{F}$ . Nas condições atuais, a atividade produzida pode alcançar, ao final do bombardeamento, 111 GBq (3,0 Ci) de  $^{18}\text{F}$  em 2 horas de irradiação, sendo o rendimento do processo de síntese do  $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$  em média de 50%.

Uma falha na produção  $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$  pode atrasar ou impedir<sup>3</sup> a realização do exame, muitas vezes vital para o paciente. Portanto, a confiabilidade da cadeia produtiva é de grande importância para todos os envolvidos na realização desses exames com PET.

A rotina de produção do  $^{18}\text{F}$  inicia-se por volta das 06:30 h da manhã, diariamente, quando o acelerador RDS-111 é ligado, 15 minutos depois realiza-se o procedimento de carga do porta-alvo com água enriquecida. Após isto, o material alvo começa a ser irradiado (por até 2 horas dependendo do número de pedidos hospitalares solicitados) ocorrendo a transformação do  $^{18}\text{O}$  em  $^{18}\text{F}$  por meio da reação nuclear  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ . Após a irradiação a água enriquecida com  $^{18}\text{O}$  é transferida junto com o  $^{18}\text{F}$  dissolvido, para o módulo de síntese do  $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ . O processo de síntese consome cerca de 30 minutos. Após a síntese, o produto é analisado, fracionado, embalado e rotulado, seguindo por meio de transporte rodoviário/aeroviário para hospitais/clínicas que realizam o exame.

## 2 - Fundamentos sobre o funcionamento do RDS-111

Os íons negativos de hidrogênio ( $\text{H}^-$ ) são injetados na região de aceleração, onde tem sua energia multiplicada por oito em cada órbita, à medida que cruzam os limites dos quatro eletrodos chamados “dês”. A aceleração do feixe ocorre em um campo magnético

<sup>2</sup> Existem dois mecanismos de “stripper” montados diametralmente opostos no ciclotron RDS-111 que extraem os íons do acelerador para direcioná-los às duas linhas de feixe.

<sup>3</sup> Há poucas opções pra substituições imediatas, visto que há poucos centros produtores de Flúor-18 no Brasil, além disto, sua meia-vida é curta o que pode inviabilizar economicamente o transporte por longas distâncias.

<sup>1</sup> Agência FAPESP, em 29/10/2010. <http://www.agencia.fapesp.br/materia/10122/especiais/imagem-molecular.htm>

produzido por uma bobina que faz com que o feixe percorra uma trajetória em “espiral” na direção do raio de extração. Durante a aceleração, os íons negativos vão se movendo em suas órbitas, desde o centro deste acelerador, até atingirem o raio de extração. Neste momento, esses íons colidem com uma folha de carbono com 5  $\mu\text{m}$  de espessura que intercepta o feixe. Quando os íons negativos ( $\text{H}^-$ ) atravessam esta folha perdem os dois elétrons fracamente ligados, transformando-se em íons  $\text{H}^+$  (prótons) (outros produtos podem ser obtidos, conforme descrito por GULLEY et al., 1996). Com a mudança de polaridade da carga dos íons a trajetória é alterada devido à interação com o campo magnético e os prótons são direcionados para uma das portas de saída do ciclotron. Quando o feixe de íons  $\text{H}^+$  atinge o material alvo (água enriquecida em  $^{18}\text{O}$ ) ocorre a reação nuclear desejada  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ .

Os sistemas de irradiação de alvos líquidos necessitam de uma janela de separação entre o material alvo e a linha de feixe, que deve permanecer em alto vácuo (aproximadamente  $10^{-7}$  mbar). Os materiais utilizados nestas janelas precisam ter alta resistência mecânica e térmica e alto ponto de fusão, para que, mesmo possuindo espessura mínima (já que devem produzir a menor interferência possível às características do feixe), ainda assim sejam capazes de resistir a pressão interna da cavidade do porta-alvo.

O sistema de porta alvos do acelerador RDS-111 foi atualizado para Eclipse<sup>RD</sup>. Esta mudança proporcionou uma melhora na eficiência de refrigeração, simplificou o sistema, pois suprimiu o sistema de refrigeração por injeção de hélio<sup>4</sup> entre as janelas. Além disto, possibilitou aumentar a produção de  $^{18}\text{F}$ , visto que é possível operar em correntes de até 60  $\mu\text{A}$  diferentemente do sistema original que permitia correntes de até 40  $\mu\text{A}$ . O porta-alvo deste acelerador foi projetado para ser capaz de dissipar cada vez mais potência de feixe e com isso realizar troca de calor mais eficiente na parte anterior e posterior das cavidades refrigerada à água.

---

<sup>4</sup> Utilizado na refrigeração das janelas: uma para contenção da solução-alvo e a outra para contenção do “vácuo” da câmara.

Neste sistema Eclipse, a janela do porta-alvo é construída em Havar (liga contendo cobalto, cromo, ferro, níquel, manganês, tungstênio e molibdênio) e é apoiada por uma grade hexagonal de cobre (motivo deste trabalho) que apresenta 91% de transparência ao feixe (ALVORD et al., 2005) e é usada para suportar e refrigerar a janela do porta-alvo. Na Figura 1 é apresentado um sistema porta-alvo utilizado no acelerador RDS-111.

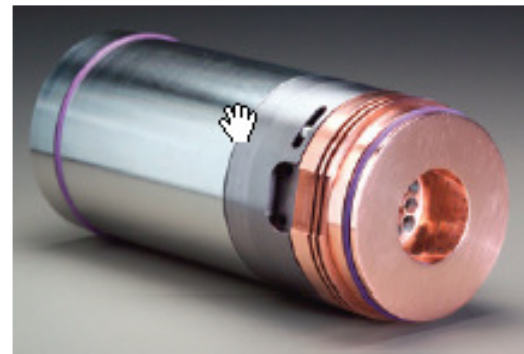


Figura 1 – Sistema porta-alvo.

### 3 - Identificação de falhas no RDS-111

A ação da intensa irradiação produzida pelo feixe de prótons, e dos subprodutos, gerados nas reações induzidas nos materiais presentes no acelerador (nêutrons, raios gamas etc.) pela reação  $\text{O}^{18}(p, n)^{18}\text{F}$  é a responsável pela ativação desses materiais, e também pelos danos causados à janela do porta-alvo e à grade hexagonal, implicando, algumas vezes, em perda de suas funções (O'DONNELL et al., 2004; BIRATTARI et al., 1989; SILARI, 2001).

Durante as irradiações para a produção do radioisótopo  $^{18}\text{F}$  no acelerador RDS do IEN, a ocorrência de falhas no sistema do porta-alvo (aqui incluído a grade hexagonal) pode resultar, em perda de produção, além de um acréscimo na dose de radiação recebida pelos trabalhadores envolvidos com a manutenção do ciclotron. As principais fontes de exposição de radiação aos trabalhadores durante a desmontagem/remontagem do sistema porta-alvo localiza-se na janela construída em Havar<sup>5</sup> e principalmente na grade hexagonal.

Esta tem apresentado defeito após um período em torno de 380 horas de funcionamento do acelerador (com correntes típicas como as descritas na Tabela 1). Uma das faces do hexágono sofre uma ruptura, conforme mostrado em detalhes na Figura 2, ocasionando um afundamento na face que serve de apoio para a janela de Havar do alvo.

Desta forma, a janela não se assenta adequadamente ocorrendo vazamento da solução alvo (água enriquecida em  $^{18}\text{O}$ ) e tendo como consequência uma piora drástica do “vácuo”, o que muitas vezes inviabiliza<sup>6</sup> a produção.

Tabela 1 – Valores de corrente operacionais.

Fonte de íons	180 mA
Folha de grafite	57 $\mu\text{A}$
Alvo de $^{18}\text{F}^-$	50 $\mu\text{A}$

Devido a problemas relacionados ao processo de importação, decidiu-se fabricar a grade aqui no Brasil.

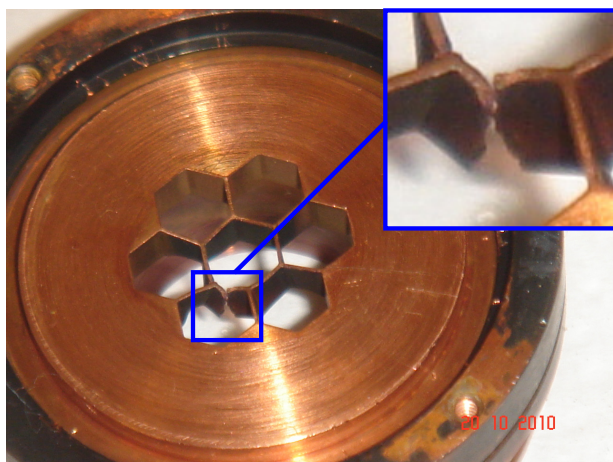


Figura 2- Grade hexagonal defeituosa

<sup>5</sup> Como a folha de Havar precisa ser substituída periodicamente, essas folhas usadas passam a constituir resíduo radioativo sólido cuja manipulação, armazenamento e descarte devem ser feitos seguindo os critérios preconizados pela CNEN. Entre outros cuidados, elas precisam ser armazenados como resíduos radioativos sólidos em recipiente blindado, por pelo menos, dois anos (PANT e SENTHAMIZHCHELVAN, 2007).

<sup>6</sup> Caso o outro porta-alvo não esteja preparado para entrar em operação.

#### 4 - Minimização de falhas

Fez-se o levantamento dimensional da grade, atentos a reproduzi-la fielmente (com a maior precisão possível), uma vez que o objetivo era confeccionar uma outra peça idêntica, para garantir uma perfeita remontagem de todo o sistema porta-alvo.

Vale destacar que este levantamento dimensional foi uma tarefa inconveniente, já que a grade estava radioativa e assim, o tempo para manuseá-la era limitado, devido a observância dos procedimentos de proteção radiológica. A grade apresentava taxas de dose da ordem de  $8,0 \text{ mSv.h}^{-1}$  na sua superfície. O tempo máximo de manipulação da peça foi cuidadosamente avaliado e controlado, resguardando, assim, a equipe, e evitando-se recebimento de dose individual além do limite estabelecido pela norma vigente no país (CNEN NE 3.01).

Procurando preservar todas as outras características físicas da grade, ela foi construída com cobre eletrolítico de alto grau de pureza (maior que 99,95%).

#### 5 - Conclusões

Após a remontagem do sistema do porta-alvo com a nova grade fabricada no Brasil, testes iniciais foram realizados e mostraram-se satisfatórios. Inicialmente verificou-se que a peça foi devidamente construída, pois a remontagem do porta-alvo ocorreu de forma fácil e rápida. A refrigeração e a estanqueidade do sistema porta-alvo mostrou-se estável, não ocorrendo vazamento da solução alvo e nem piora no valor do “vácuo” da câmara do acelerador, mesmo quando em operação de irradiação. A pressão interna no porta-alvo manteve-se dentro dos valores operacionais utilizados nas irradiações de produção (em torno de 550 psi) quando submetido a correntes da ordem de 50  $\mu\text{A}$ .

Vale destacar que o porta-alvo com a nova grade está em operação há mais de seis meses, perfazendo um total de 172 horas de irradiação, sob correntes da ordem de 50  $\mu\text{A}$  funcionando perfeitamente, sem apresentar prejuízos nas condições de irradiação e mantendo a confiabilidade do acelerador.

A nacionalização da grade, além das vantagens óbvias como independência do fabricante, e dos entraves burocráticos, envolvidos em processos de importação, ainda trouxe economia de mais de 90% no custo de aquisição da peça. Mas, um das maiores benefícios, foi o ganho proporcionado com a maior agilidade e autonomia na manutenção do acelerador, o que proporcionou um menor tempo de máquina “parada”.

Devido ao êxito na fabricação da grade, novos estudos estão sendo realizados, visando um aperfeiçoamento para aumentar a sua vida útil e a determinação do tempo limite de seu uso, de maneira que, com a sua troca preventiva, evitem-se os efeitos danosos que uma deformação estrutural nela ocorrida, traria.

No próximo relatório (Parte II), serão abordadas as modificações inseridas no projeto original da grade.

## Referências

- Alvord, C.W., Williamson, A.C., Graves, T.L., Zigler, S.S., 2005. Design, test and widespread implementation of a compact kilo-Watt fluoride ion target. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 241, p. 708-712.
- Birattari, C., Cantone, M.C., Ferrari, A., Silari, M., 1989. Residual radioactivity at the Milan AVF cyclotron. *Nucl. Instrum. Methods. B* 43, 119–126.
- Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1988. Diretrizes Básicas de Radioproteção. CNEN-NE n° 3.01, Rio de Janeiro, Brasil.
- RDS-111 operating instructions, CTI Inc: Knoxville, USA; 2000.
- Gulley, M.S., Keateng, P.B., Bryant, H.C., Mackerrow, E. P.; Miller, W.A., Rislove, D.H.; Frankle, S.C., Funk, D.J., Hutson, R.L., Macek, R.J., Plum, M.A., Stanciu, N. G., Van Dyck, O.B., Wilkinson, C.A., 1996. Measurement of  $H^-$ ,  $H^0$  and  $H^+$  yields produced by foil stripping of 800 MeV  $H^-$  ions. *Physical Review A*, v. 53, n. 5, p. 3201-3210, May.
- O'Donnell R.G., León Vintó L., Duffy G.J., Mitchell P.I., 2004. Measurement of the residual radioactivity induced in the front foil of a target assembly in a modern medical cyclotron. *App. Radiat. Isot.*, 60:539-42.
- Pant G.S., Senthamizhchelvan S., 2007. Initial experience with an 11 MeV self-shielded medical cyclotron on operation and radiation safety. *J. Med. Phys.*, 32:118-23.
- Silari, M., 2001. Special radiation protection aspects of medical accelerators. *Radiat. Prot. Dosim.* 96 (4), 381–392.