

Estudo de viabilidade de determinação de espectros de energia de feixes de fótons para radioterapia usando um detector de pixels

Viability study for determination of the energy spectra of photon beams for radiotherapy using a pixel detector

M. Vieira¹, F. Marinho², S. Amato¹, E. Polycarpo¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos, Araras, Brasil

Resumo

O conhecimento do espectro de energia produzido por um acelerador linear é fundamental para estudos que envolvam a determinação de doses nos tecidos irradiados e o planejamento detalhado de tratamentos. Uma das formas típicas de obtenção do espectro incidente no tecido irradiado é através da simulação detalhada da geometria do equipamento, porém, esta geometria frequentemente não é totalmente conhecida. O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade de uma técnica alternativa para obtenção de espectros na faixa de 0 a 6 MeV. Nessa técnica, o espectro incidente é reconstruído a partir da deconvolução do espectro de energia depositada em um detector de silício com uma função resposta conhecida. Essa função resposta foi obtida através da simulação da incidência de fótons em um detector híbrido de pixels de silício. Variando-se parâmetros do método como número de fótons incidentes para o espectro de energia depositada e a dimensão e número de fótons da matriz resposta, foi possível avaliar como estes influenciam na qualidade do espectro reconstruído. Foi estimado um tempo de exposição de cerca de 2,5 h para uma implementação experimental do método em um acelerador clínico.

Palavras-chave: função resposta; espectro de energia; Monte Carlo; detector de pixels.

Abstract

Knowledge of the energy spectrum produced by a linear accelerator is crucial for studies related to determination of doses and detailed treatment planning. One of the typical ways of obtaining the spectrum incident in the irradiated tissue is through the detailed simulation of the geometry of the equipment, however, this geometry is often not fully known. The aim of this work is to verify the viability of an alternative technique to obtain spectra in the 0 to 6 MeV range. In this technique, the incident spectrum is reconstructed by deconvolution of the deposited energy spectrum measured in a hybrid silicon pixel detector with known response function. This response function was obtained through a Monte Carlo simulation of photons passing through a hybrid silicon pixel detector. Varying parameters such as number of events used for the simulation of the deposited energy spectrum and the dimensions and number of photons for the determination of the response matrix, it was possible to evaluate how they influence the quality of the reconstructed spectrum. An exposition time of about 2.5 h was estimated for the procedure to be implemented experimentally.

Keywords: response function; energy spectrum; Monte Carlo; pixel detector.

1. Introdução

A utilização de aceleradores lineares na radioterapia permite obter um alto grau de controle e precisão da dose entregue ao alvo. Devido à sua ampla utilização em tratamentos, há uma grande variedade de estudos na literatura com o objetivo de aprimorar o uso desses aceleradores.¹

O conhecimento do espectro de energia dos fótons produzidos nos aceleradores é necessário tanto para estudos de design do equipamento, realizados por fabricantes, como para estudos detalhados de planejamento dos tratamentos.²

Uma das principais formas de determinação do espectro de energia de aceleradores clínicos é a simulação detalhada da geometria do equipamento, que além de exigir um grande trabalho de modelagem, muitas vezes possui limitações devido a detalhes desconhecidos da geometria.²

Como alternativa, a proposta apresentada nesse trabalho consiste na reconstrução do espectro incidente a partir da deconvolução do espectro de energia depositada em um detector híbrido de silício, cuja função resposta é determinada por simulação de Monte Carlo.³

O objetivo do trabalho é verificar a viabilidade do método, bem como otimizar a sua utilização, a partir de simulações onde os fótons emitidos pelo acelerador incidem no detector posicionado como alvo na linha do feixe.

2. Materiais e Métodos

Para a realização do trabalho foi utilizado o software Geant4⁴ com o pacote PENELOPE para as interações físicas dos fótons com um detector híbrido composto de um sensor de 256x256 pixels de silício com superfície quadrada de 1,4 cm de lado e 300 µm

de espessura equipado com eletrônica de leitura Timepix.⁶ Este detector está disponível no Laboratório de Física de Partículas do Instituto de Física da UFRJ e é normalmente utilizado para determinação precisa de trajetórias de partículas carregadas. Permite a determinação da energia depositada por pixel em intervalos finitos de tempo (frames), cuja duração pode ser ajustada de acordo com as taxas de fluência presentes.

Inicialmente, foi simulada uma incidência de feixe ortogonal à superfície do detector. Porém, devido à natureza da interação dos fótons com o material do detector na faixa de energia relevante para o problema, para a qual há predominância de espalhamento Compton, tal configuração se mostrou uma limitação ao método do ponto de vista estatístico, já que menos de 1% dos fótons com energia acima de 200 keV deposita alguma energia no detector ao atravessar os seus 300 μm de espessura. Assim, uma geometria de incidência paralela ao plano de pixels do sensor foi adotada, onde há cerca de 1,4 cm de material a ser atravessado. Nesse caso, a fração de fótons que deposita alguma energia no sensor aumenta de um fator que varia de 10 a 30 na faixa de 0 a 6,0 MeV de energia, quando comparado com a incidência ortogonal.

2.1. Deconvolução

O procedimento é baseado em obter o espectro de energia depositada de acordo com a equação 1.³

$$N(E') = \int_0^\infty R(E', E)S(E)dE \quad (1)$$

onde N(E') representa o espectro de energia depositada, R(E',E) a função resposta, característica do detector, e S(E) o espectro de energia incidente. Para intervalos discretos de energia:³

$$N_i = \sum_{j=1}^{max} R_{ij}S_j \quad \text{ou} \quad \vec{N} = R\vec{S} \quad (2)$$

Ou seja, através do conhecimento do espectro de energia depositada \vec{N} e da função resposta R é possível resolver a equação 2 de modo a se obter o espectro de energia incidente \vec{S} . Para realização desta etapa, foram utilizados uma matriz resposta quadrada e, portanto, vetores \vec{S} e \vec{N} , bem como a biblioteca de código aberto Eigen.⁷

Para a determinação da matriz resposta, foram geradas amostras de eventos em que simula-se a incidência de fótons com um espectro de energia uniforme entre 0 e 6 MeV no detector. A simulação não leva em conta efeitos de ruído na eletrônica.

2.2 Parâmetros de Otimização do Método

O espectro de energia adotado como referência é proveniente de uma estimativa numérica de Monte Carlo para um acelerador Varian Clinac 600C, e pode ser visto como uma linha sólida azul na figura 2.

Para avaliar a compatibilidade do espectro reconstruído com o espectro de referência gerado, utilizamos uma variável do tipo χ^2 , definida como:

$$\chi^2/ndf = \frac{1}{N_{bins}} \sum_{i=1}^{N_{bins}} \frac{(S_i^{rec} - S_i^{ref})^2}{S_i^{ref}} \quad (3)$$

onde N_{bins} é o número de intervalos do espectro usado na comparação (em geral 24 ou 30 bins), S_i^{rec} é a fração de fótons reconstruídos no intervalo de energia i , S_i^{ref} é a fração de fótons gerados de acordo com o espectro de referência no mesmo intervalo i e ndf é o número de graus de liberdade.

Foram realizados estudos de dependência do χ^2/ndf com os seguintes parâmetros: número de iterações realizadas na deconvolução; número de fótons gerados para obtenção do espectro de energia depositada e da matriz de função resposta; dimensão da matriz de função resposta.

O número de iterações foi variado de 50 a 979, sendo este último o número de iterações padrão para o código utilizado. Para a obtenção do espectro de energia depositada foram gerados 2, 10, 20, 30, 50 e 100 milhões de fótons e para a obtenção da função resposta 100, 200, 400, 600, 1000, 1400 e 1600 milhões de fótons. Foram feitas deconvoluções utilizando 24, 30, 60, 120, 360 e 720 bins.

3. Resultados

A figura 1 revela a dependência do χ^2/ndf com o número de iterações realizadas para a deconvolução, usando uma função resposta obtida com 200 milhões de eventos e uma simulação com 100 milhões de fótons gerados para obtenção do espectro de energia depositada. Foram utilizados 720 bins para deconvolução. Na figura 2 são exibidos os espectros reconstruídos para dois pontos do gráfico na figura 1 (com 160 e 979 iterações) superpostos ao espectro incidente. Nota-se uma convergência do χ^2/ndf partir de cerca de 300 iterações. A partir dos resultados da figura 2, foram obtidas as discrepâncias relativas entre os espectros reconstruídos e o espectro incidente original, utilizado como referência. Essas discrepâncias são exibidas na figura 3, onde as linhas vermelhas delimitam valores dentro de uma margem de $\pm 10\%$.

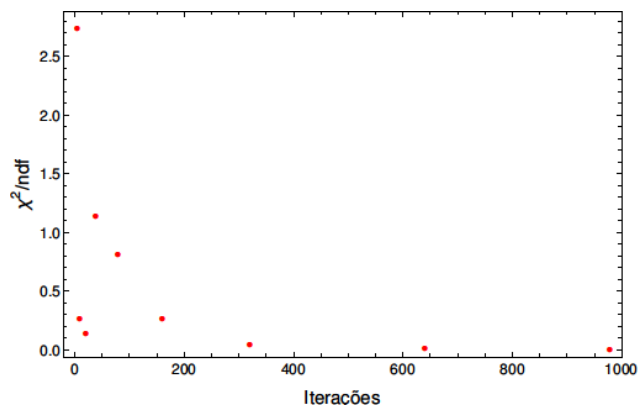


Figura 1. Dependência do χ^2/ndf com o número de iterações da deconvolução.

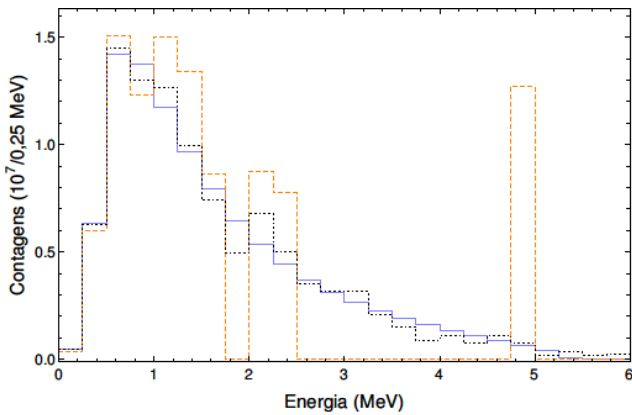


Figura 2. Espectro incidente reconstruído, utilizando 160 iterações (linha laranja tracejada) e 979 iterações (linha preta pontilhada), e o espectro incidente de referência (linha sólida azul).

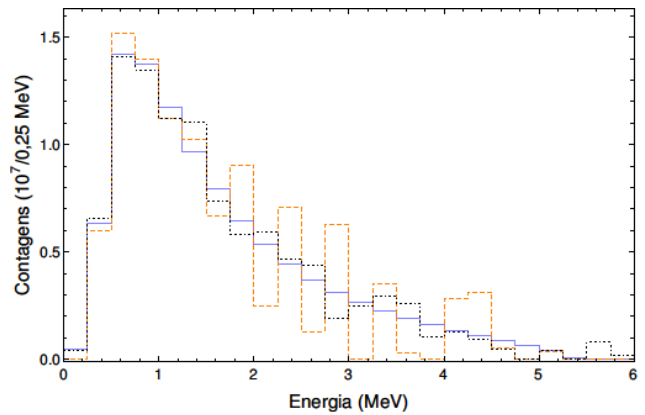


Figura 5. Espectro incidente reconstruído, utilizando 24 bins (linha laranja tracejada) e 360 bins (linha preta pontilhada), superpostos ao espectro incidente de referência (linha sólida azul).

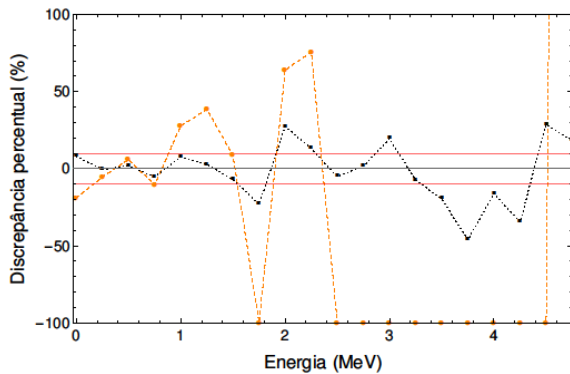


Figura 3. Discrepâncias percentuais entre os espectros reconstruídos e de referência, com 160 iterações (laranja tracejado) e o 979 iterações para deconvolução (preto pontilhado). As linhas unem os pontos apenas para guiar a visão.

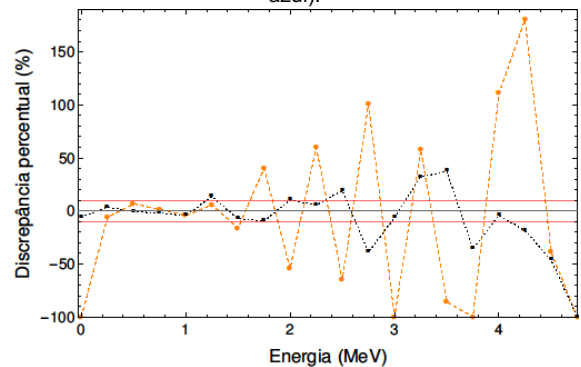


Figura 6. Discrepâncias percentuais entre os espectros reconstruídos e de referência, utilizando 24 bins (laranja tracejado) e 360 bins (preto pontilhado).

A figura 4 mostra a dependência do χ^2/ndf com a dimensão da matriz resposta. Esses resultados foram obtidos com o número de iterações padrão do algoritmo de deconvolução e com uma matriz resposta obtida com 200 milhões de fótons gerados. O espectro de energia depositada utilizado para esses resultados foi obtido com 100 milhões de fótons incidentes no detector. A figura 5 mostra os espectros reconstruídos com 24 e 360 bins na matriz resposta, superpostos ao espectro de referência. As discrepâncias percentuais correspondentes são exibidas na figura 6, novamente com as linhas vermelhas delimitando uma margem de $\pm 10\%$.

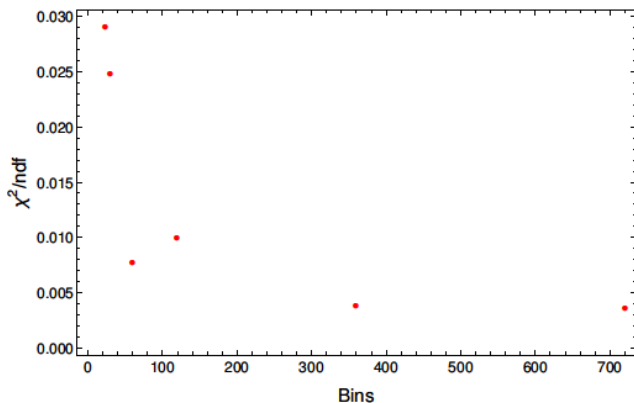


Figura 4. Dependência do χ^2/ndf com a dimensão da matriz resposta e vetores dos espectros de energia depositada utilizados para deconvolução.

A dependência do χ^2/ndf com o número de eventos utilizados para a obtenção do espectro de energia depositada é apresentada na figura 7. Na figura 8, os espectros reconstruídos com 2 e 50 milhões de fótons incidentes no detector são superpostos ao espectro de referência. Nesse caso, são utilizados 200 milhões de eventos para gerar a função resposta e 720 bins para deconvolução. As discrepâncias percentuais são mostradas na figura 9.

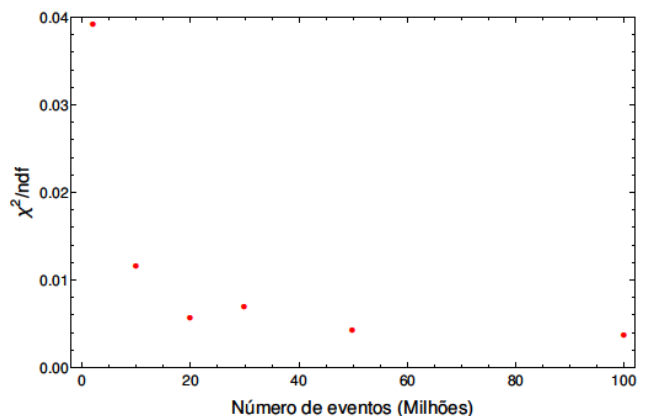


Figura 7. Dependência do χ^2/ndf com número de fótons incidentes no detector para espectro de energia depositada.

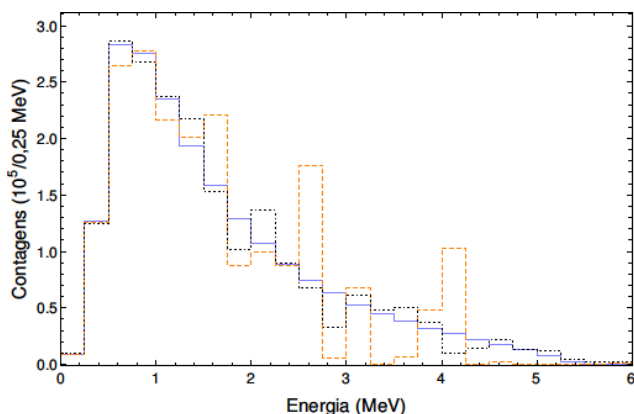


Figura 8. Espectro incidente reconstruído, utilizando 2 milhões ((linha laranja tracejada) e 50 milhões (linha preta pontilhada) de eventos para o espectro de energia depositada, superpostos ao espectro incidente de referência (linha sólida azul).

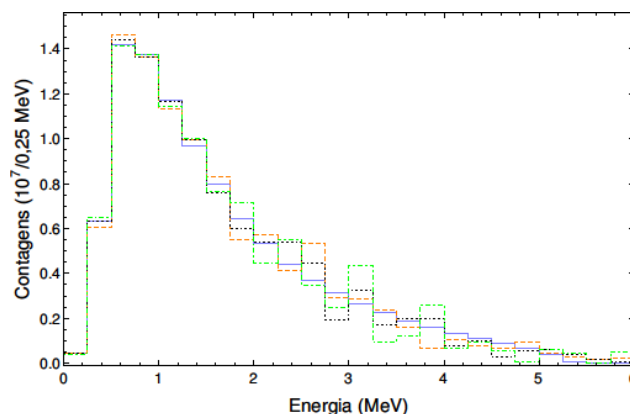


Figura 11. Espectro incidente reconstruído, utilizando 100 milhões (linha laranja tracejada), 600 milhões (linha preta pontilhada) e 1600 milhões (verde) de eventos simulados para a determinação da matriz resposta, superpostos ao espectro de referência (linha sólida azul).

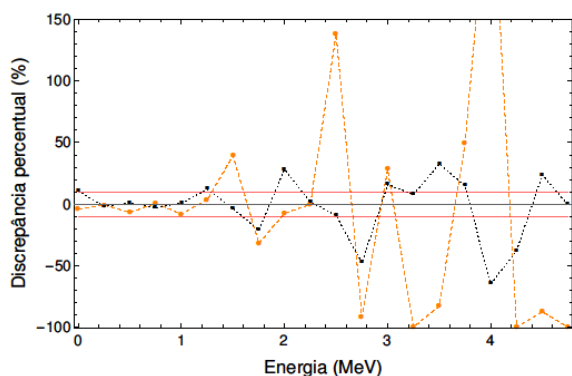


Figura 9. Discrepâncias percentuais entre os espectros reconstruídos e de referência, utilizando 2 milhões (laranja tracejado) e 50 milhões (preto pontilhado) de eventos para o espectro de energia depositada.

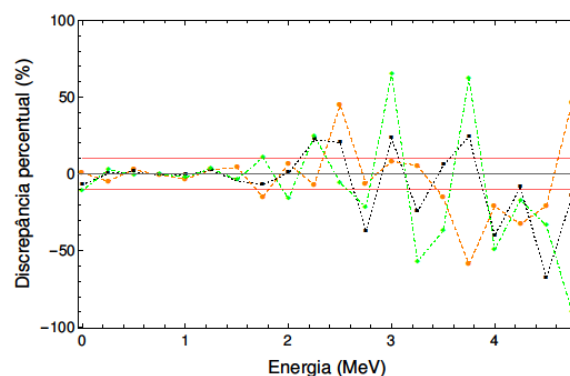


Figura 12. Discrepâncias percentuais entre os espectros reconstruídos e de referência, utilizando 100 milhões (laranja tracejado), 600 milhões (preto pontilhado) e 1600 milhões (verde traço-ponto) de eventos.

Finalmente, a figura 10 exibe a variação do χ^2/ndf com o número de eventos utilizados para obtenção da função resposta. Em seguida, a figura 11 traz os espectros reconstruídos ao utilizar uma matriz resposta obtida com 100, 600 e 1600 milhões de eventos, todos utilizando 100 milhões de fótons para o espectro de energia depositada e 720 bins para deconvolução. A figura 12 exibe os valores das discrepâncias percentuais para cada um destes casos.

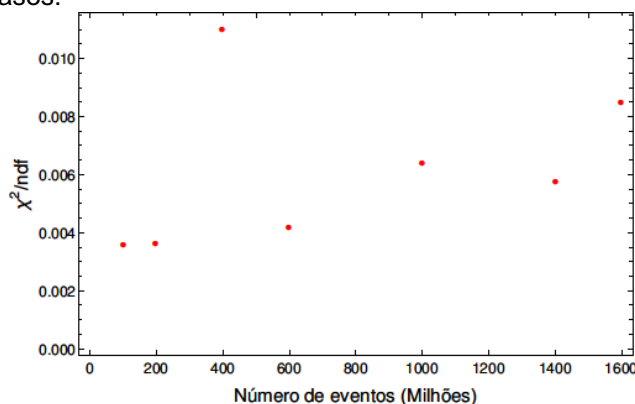


Figura 10. Comportamento do χ^2/ndf com o número de eventos utilizados para obtenção da matriz resposta.

4. Discussão

A convergência do método de deconvolução com o aumento do número de iterações foi estudada, levando à conclusão de que o número padrão do software empregado é seguro, como ilustrado nas figuras 1 a 3.

Nas figuras 4 a 6, evidencia-se que a qualidade do espectro reconstruído melhora à medida que se aumenta a dimensão da matriz resposta e, correspondentemente, o número de intervalos em que o espectro de energia depositada é dividido. Também é possível notar que tal melhoria se torna cada vez menos expressiva, sugerindo uma convergência para valores no intervalo [300,720].

A partir das figuras de 7 a 9, percebe-se a melhoria do processo de reconstrução com um aumento do tamanho das amostras simuladas para obtenção do espectro de energia depositada. Isso se mostra mais relevante para a faixa de energia mais alta do espectro reconstruído, na qual as probabilidades de interação se reduzem. Comparando-se as discrepâncias relativas obtidas, percebe-se uma diminuição expressiva entre os espectros reconstruídos com amostras de 2 e 50 milhões de fótons incidentes no detector, especialmente a partir de 1,5 MeV.

Não é possível tirar uma conclusão sobre a dependência da qualidade do processo de reconstrução do espectro de fótons incidentes com o aumento do número de eventos simulados para obtenção da matriz resposta, ilustrada nas figuras 10 a 12. Os valores de χ^2/ndf parecem flutuar em torno de um valor médio e talvez seja necessário um aumento de amostra superior a uma ou duas ordens de grandeza para que uma avaliação mais rigorosa sobre esse parâmetro possa ser realizada.

Supondo que a qualidade do espectro reconstruído com 10 milhões de fótons incidentes para a determinação do espectro de energia depositada (com, por exemplo, uma matriz resposta de dimensão 720x720 obtida com uma amostra de 600 milhões de fótons) seja suficiente para justificar uma implementação experimental do método em um acelerador clínico, pode-se estimar o tempo de exposição necessário para se obter essa amostra.

Por exemplo, para um acelerador que forneça uma taxa de dose de 1 Gy/min e um campo com área 10x10 cm², estima-se uma emissão de 1,6x10⁹ fótons/min/cm². Levando-se em conta a área da seção reta do detector (1,4 x 0,03 cm²) e uma tomada de dados com frames de 10 μ s, espera-se uma incidência de 11 fótons/frame no detector. A uma taxa de 100 frames/s, são necessários então 9,1x10³ s, ou 2,5 h para se adquirir um espectro de energia depositada correspondente a uma simulação de 10 milhões de fótons.

5. Conclusões e perspectivas

A partir de estudos de simulação usando GEANT4 e PENELOPE, foi feito um estudo de viabilidade do uso de um detector de pixels, normalmente utilizado em física de altas energias para determinar com precisão a trajetória de partículas carregadas, para a determinação de espectros de energia de fótons de aceleradores clínicos de radioterapia.

A reconstrução do espectro incidente se dá por meio da deconvolução do espectro de energia depositada no detector, utilizando a função resposta do mesmo. A função resposta foi obtida por meio do mesmo tipo de simulação.

Foi alcançada uma precisão na reconstrução do espectro em torno de 5% na faixa de 0 a 2 MeV. Na faixa de 2 a 6 MeV, discrepâncias médias em relação ao espectro de referência encontram-se na faixa de 10 a 50%, para as melhores configurações do método, porém, flutuam em torno de 0 de tal forma que as discrepâncias correspondentes em termos de dose devem ser bem reduzidas.

Antes de se buscar novas formas de otimizar a reconstrução na faixa de energia mais alta do espectro, é necessário incluir os efeitos da eletrônica na simulação. Entretanto, esses efeitos não devem afetar de maneira significativa a forma dos espectros de energia depositada e, por consequência, a capacidade de reconstrução do espectro incidente. Outra etapa necessária é a validação da simulação com medidas experimentais. Um tempo de exposição de cerca de 2,5 h foi estimado como suficiente para

uma reconstrução do espectro que poderia ser usada para essa validação.

Os resultados apresentados são bastante promissores e indicam que o método proposto é viável.

Agradecimentos

Agradecemos à Dra. Simone Coutinho Cardoso pelo fornecimento do espectro de referência e pelas valiosas discussões e sugestões. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq através de bolsa de pesquisa e de bolsa de iniciação científica.

Referências

1. Thwaites, D., & Tuohy, J. Back to the future: The history and development of the clinical linear accelerator. *Phys. Med. Biol.* 2006; 51(13), R343-R362.
2. Chang-Ming Ma. Monte Carlo modelling of electron beams from medical accelerators. *Phys. Med. Biol.* 1999; 44(12), R157-R189.
3. Michel, Talla, Firsching, Durst, Böhnell, & Anton. Reconstruction of X-ray spectra with the energy sensitive photon counting detector Medipix2. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2009; 598(2), 510-514.
4. Geant4 - A Simulation Toolkit, S. Agostinelli et al., *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003; 506 250-303.
5. Rene Brun and Fons Rademakers, *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* Sep. 1996; 389 81-86.
6. Marinho, & Akiba. A GEANT4 based simulation for pixelated X-ray hybrid detectors. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2015; 772, 50-51.
7. Guennebaud, Gaël, et al. "Eigen v3." 2010; 202.

Contato:

Marcos Guilherme Vieira Junior
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
E-mail: marcosvjunior@if.ufrj.br