

## Paralelo de resultados empíricos com simulados por MCNPX de espectros de raios-X com um semicondutor.

**Santos, LR<sup>1,2</sup>; Santos, WS<sup>3</sup>; Navarro, MVT<sup>4</sup>; Vivolo, V<sup>1</sup>; Potiens, MPA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP); <sup>2</sup> Instituto Federal de São Paulo (IFSP); <sup>4</sup> Instituto Federal da Bahia (IFBA), <sup>3</sup> Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia (INFIS/UFU).

E-mail: dossantos.lucasrodrigues@gmail.com

**Resumo:** O objetivo geral deste trabalho foi utilizar o código de transporte de radiação MCNPX para simular espectros de raios-X gerados por um sistema de potencial constante em um detector semicondutor de CdTe. Como parte do processo de validação, foram obtidos uma série de espectros experimentais. Comparativamente, em todas as situações há uma boa concordância entre os dois conjuntos de espectros. Não houve diferenças estatisticamente significativas observadas entre os resultados experimentais com os simulados.

**Palavras-chave:** espectrometria de raios X, Simulação por MCNPX, detector de CdTe.

**Abstract:** The aim of this study was to use the MCNPX radiation transport code to simulate X-ray spectra generated by a constant voltage system in a CdTe semiconductor detector. As part of the validation process, we obtained a series of experimental spectra. Comparatively, in all cases there is a good correlation between the two spectra. There were no statistically significant differences between the experimental results with the simulated.

**Keywords:** X-ray spectrometry, MCNP simulation, CdTe detector.

### 1. INTRODUÇÃO

Simulação de Monte Carlo é uma ferramenta eficiente para o cálculo de parâmetros de interação da radiação com a matéria e vem sendo empregada largamente em diferentes áreas da Física e de outros ramos da ciência. Neste sentido, o objetivo deste estudo é utilizar o código de transporte de radiação MCNPX para modelar um tubo de radiação X e um detector semicondutor de CdTe para medir espectros de raios-X utilizados em radioproteção.

O conhecimento dos espectros de raios-X gerados por sistema de radioterapia e de imagens médicas é importante para a caracterização do feixe, com conhecimento das características do tubo, isto é, se apresentam ou não impurezas nos materiais que o compõem, e é o melhor método para medição da tensão de pico (ISO, 1996). Neste caso, os feixes são comumente caracterizados por camadas semirredutoras (CSR) associadas com coeficientes de conversão de dose.

Para um mesmo potencial do tubo os diferentes equipamentos de raios X podem apresentar diferentes CSR's. Isto mostra que os espectros de raios-X podem variar significativamente de máquina para máquina e os dados experimentais resultantes de uma unidade individual são úteis para caracterizar os seus espectros para os cálculos de dose e para o programa de garantia de qualidade dos resultados deste equipamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Sistema de raios X

O sistema de radiação X de energias intermediárias é formado por um gerador de potencial constante Agfa NDT Pantak/Seifert GmbH&Co. KG., Alemanha, modelo ISOVOLT 160 HS, ligado a um tubo de raios X da Comet, modelo MRX 160/22 com anodo estacionário (alvo de Tungstênio) e janela de Berílio com 1 mm de espessura. O equipamento permite uma tensão de operação no intervalo de 5 a 160 kV com a corrente elétrica podendo variar entre 0,1 e 45 mA, chegando à potência máxima de 3 kW. Ainda associado ao sistema de radiação X há uma roda de filtros da PTW, modelo T90011, controlada via software, BenchControl S160003. A roda de filtros permite até 24 filtrações diferentes em seus consoles, sendo que o LCI/IPEN possui 19 qualidades de radiação estabelecidas em sua rotina.

Para este trabalho foram utilizadas as qualidades de feixe estreito da ISO (*narrow*) N-60, N-80 e N-100 (ISO, 1996).

### 2.2. Medição do espectro de raios X

Para obtenção dos espectros foi utilizado um detector semicondutor de CdTe fabricado pela AMPTEK, modelo XR -100 -T, com analisador multicanal com amplificador também AMPTEK, modelo PX4, e conjunto de colimadores. O detector foi calibrado utilizando fontes de radiação  $\gamma$  (Am-241 e Co-57), as linhas de

energia utilizadas foram de 59,54 keV do Am-241 e as de 14,41 e 112,06 keV do Co-57.

Os parâmetros utilizados para as medições foram: distância de 1 m do ponto focal do tubo de raios X; corrente de filamento possível (0,1 mA), para diminuir o efeito de empilhamento de contagens (*pile-up*) e as tensões de pico de 60, 80 e 100 kVp, respectivamente.

O tempo morto durante a medição não ultrapassou 1 % e o tempo de contagem foi o suficiente para que se obtivessem mais de  $3 \times 10^5$  contagens por espectro. O tempo de contagens foi limitada pelo tempo máximo de operação do sistema de radiação X, que é de 10 min, assim as curvas obtidas experimentalmente tiveram sua definição um pouco prejudicada, quando comparadas às curvas simuladas.

### 2.3. Simulação por MCNPX

Neste estudo foi utilizado o código computacional MCNPX para descrever o transporte de radiação e de partículas, tais como fótons e elétrons na matéria. O código transporta essas partículas para uma ampla faixa de energia de fótons (1 keV-100 GeV) e elétrons (1 keV-1 GeV), o que o torna atraente para muitas áreas da ciência. Para o transporte de fótons, o código contabiliza o espalhamento incoerente e coerente, a possibilidade de emissão fluorescente após a absorção fotoelétrica e bremsstrahlung. Para o transporte de elétrons, é utilizado o modelo de perda de energia por aproximação contínua. A perda de energia do elétron é acompanhada pelo MCNPX quebrando o caminho do elétron em várias etapas. Para melhorar a eficiência do elétron e do transporte de fótons, dois cartões (PHYS: P e PHYS: E) são utilizados (Pelowitz, 2011). Nestes cartões são definidos alguns dos parâmetros da física envolvida no modelo como o controle da distribuição angular e a produção de fótons por bremsstrahlung e produção de raios-X induzida por elétrons. Preliminarmente, foram analisados três espectros com potencial no tubo de raios-X de 60, 80 e 100 kVp, com respectivos

valores de espessuras de filtros adicionais de Cu, 0,7, 2,0 e 5,0 mm, que representam as filtrações dos feixes estreitos da ISO 4037 (ISO, 1996) caracterizados no LCI/IPEN, para as tensões de 60, 80 e 100 keV, respectivamente. Os espectros de raios-X emitidos do tubo foram determinados experimentalmente e simulados num detector de CdTe de 300  $\mu\text{m}$  de espessura. A resposta do detector foi simulada utilizando o comando F5 (partículas/cm<sup>2</sup>) do MCNPX que simula o fluxo de partícula em um detector pontual ou radial.

A figura 1 contém as principais informações detalhadas dos componentes do detector de CdTe. Esse detector possui uma área ativa de 7 mm<sup>2</sup> com uma janela fina de Be localizada acima do substrato de alumínio. O feixe de raios-X foi gerado por uma fonte de elétrons colimado num alvo de tungstênio com ponto focal de 1.5 mm e ângulo anódico de 12°. O feixe gerado atravessa a ampola de vidro, uma janela de Be e filtros adicionais de Cu, antes de chegar ao detector. Em todas as simulações a espessura de vidro (0,2mm) e da janela de Be (0,1mm) foram mantidas constantes.

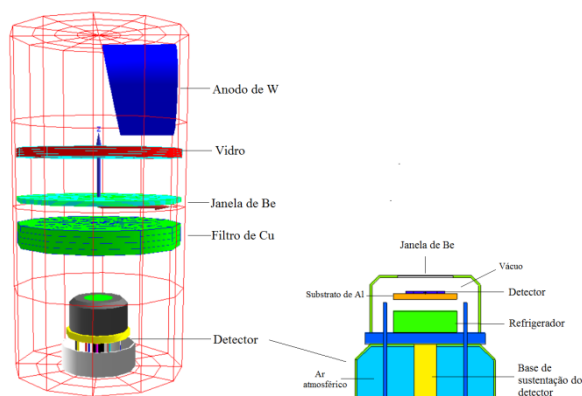


Figura 1: Vista do cenário computacional indicando a geometria dos principais componentes do tubo de raios-X e do detector XR-100-T da Amptek.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 2, 3 e 4 a seguir, em gráficos que

apresentam as contagens normalizadas pelo número de contagens máximas. Os resultados obtidos experimentalmente são comparados aos produzidos por um simulador de espectros disponibilizado pela Siemens® através do sítio <<http://www.oem-products.siemens.com/x-ray-spectra-simulation>>, onde pode-se selecionar os materiais atenuadores do feixe e obter o espectro de saída do tubo de raios X. Os espectros foram gerados com a mesma descrição utilizada para a simulação por MCNPX.

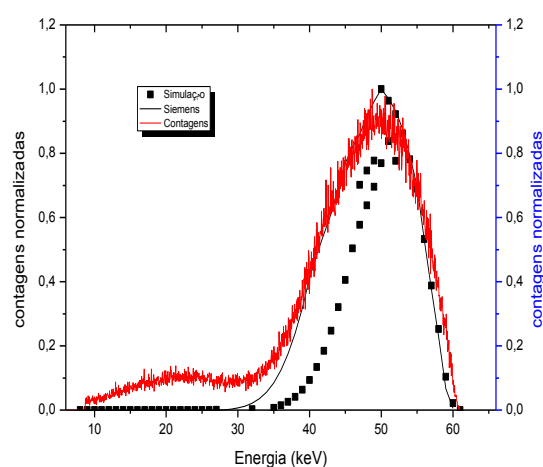


Figura 2: Espectro de 60 kV para a qualidade ISO N-60, comparado aos resultados simulados com MCNPX e pela Siemens®.

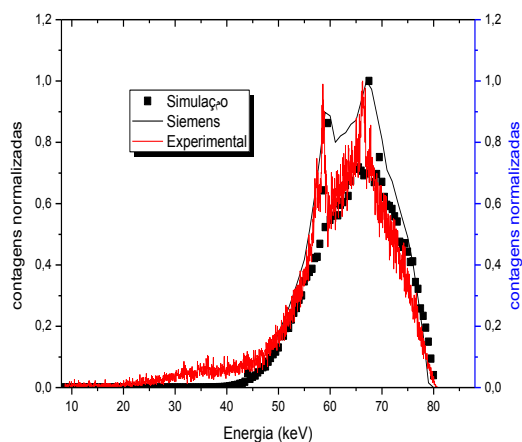


Figura 3: Espectro de 80 kV para a qualidade ISO N-60, comparado aos resultados simulados com MCNPX e pela Siemens®.

ISO N-80, comparado aos resultados simulados com MCNPX e pela Siemens®.

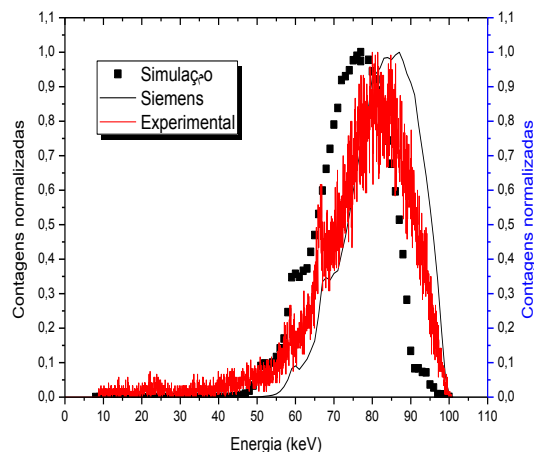


Figura 4: Espectro de 100 kV para a qualidade ISO N-100, comparado aos resultados simulados com MCNPX e pela Siemens®.

Os resultados experimentais apresentam uma boa concordância com os simulados, porém para a tensão de pico de 100 kV devido à incompleta coleção do feixe no volume sensível do detector, pela alta energia dos fótons, que atravessam o detector sem interagir há uma subestimação das contagens dos fótons mais próximos à energia de 100 keV.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que é possível estimar espectros de raios-X num detector usando o código MCNPX, pois existe boa consistência entre os espectros simulados e os resultados experimentais. Contudo, deve-se notar pequenas diferenças entre os resultados experimentais com os simulados. A precisão dos resultados simulados é altamente dependente dos detalhes do modelo utilizado no MCNPX. Conseguir uma estimativa precisa para a resposta do detector envolve um controle

cuidadoso de variáveis que o código não simula, como o ruído eletrônico. O uso do código MCNPX para a obtenção espectral foi comprovada neste estudo, e acreditamos que seja uma ferramenta útil para ampliar os resultados da literatura

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte parcial financeiro da FINEP/MCTI (projeto número 01.10.0650.01); Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Ministério do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT em Metrologia das Radiações na Medicina) do MCTI e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP).

#### 7. REFERÊNCIAS

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: radiation characteristics and production methods. 1996, Geneva. (ISO 4037-1).

Pelowitz, D.B. MCNPX User's Manual, version 2.7.0. 2011, Report LA-CP-11-00438, Los Alamos National Laboratory, USA.

Simulation of X-ray Spectra. Disponível em: <<http://www.oem-products.siemens.com/x-ray-spectra-simulation>>. Acesso em: 09/07/2016