

Colimador alternativo para um detector de CdTe (modelo XR-100T), usado em medidas diretas de espectros de radiodiagnóstico.

C. Soares¹; M. V. Manso Guevara¹; L. Nieto²; F. Mas Milian¹, F. Garcia¹

¹Departamento de Ciências Exatas/CPqCTR/UESC, CEP 45662-900, Ilheus-Bahia, Brasil

²Departamento de Ciências Exatas e Naturais/UESB, Itapetinga-Bahia, Brasil

mvictoria.mansoguevara@gmail.com;

(Recebido em 14 de outubro de 2013; aceito em 29 de dezembro de 2013)

A simulação de espectros é um instrumento de grande utilidade prática e pedagógica porque ajuda a compreender os limites de uma técnica, e os parâmetros instrumentais para otimizar medidas de grandezas de grande interesse na física. Os modelos de Monte Carlo, baseados no transporte de partículas e radiação, provêm ferramentas fáceis e flexíveis para simular geometrias e materiais complexos. Em particular, o código MCNPX permite a comparação, manipulação e quantificação de espectros medidos e simulados. Este trabalho auxilia-se desta ferramenta para estimar as características de um dispositivo de colimação que evite danos permanentes e temporários num detector de CdTe, quando usado para medidas diretas do espectro de Bremsstrahlung de tubos de raios X, com voltagem máxima nominal de 150 kVp e cargas típicas usadas em protocolos de radiologia. No trabalho mostram-se também os espectros de altura de pulsos, simulados e medidos com este detector.

Palavras-chave: simulação Monte Carlo, espectros de radiodiagnóstico, colimadores.

Alternative collimator for CdTe (model XR-100T), when it is used for a direct measurements of radiodiagnostic spectra.

The spectrum simulation is a powerful instrument of great practical and pedagogical usefulness, because it helps to understand the technical and the instrumental limits of parameters in optimized measurements of magnitudes of interest in physics. Monte Carlo models, based on particle and radiation transport, provide easy and flexible tools for simulating complex geometries and materials. Particularly, MCNPX code is used to compare, manipulate, and quantify simulated and measured spectra. The purpose of this work is to use this toolset to estimate the characteristics of a collimation device, avoiding permanent and temporary damages into the diode-pin detector, during direct measurements of the Bremsstrahlung's spectrum, which was generated from diagnosis tubes with medical purpose. The simulations were made with a maximum voltage of 150 kVp, and typical charges used in radiological protocols in the medical area. Also, differential high pulse spectra, simulated and measured with a CdTe Detector, are reported.

Keywords: Monte Carlo simulation, X-ray radiodiagnostic spectra, collimators.

1. INTRODUÇÃO

A tensão de aceleração de elétrons num tubo de raios X (kVp), e a carga (mAs) são parâmetros importantes que afetam a qualidade da imagem em mamografia e radiologia diagnóstica [1], mas também contribuem ao aumento da dose absorvida pelos pacientes. Estas grandezas, relacionadas com a energia máxima e intensidade do espectro são também conhecidas como qualidade de um feixe de radiação, podendo ser determinadas a partir do próprio espectro.

Em programas de controle de qualidade de equipamentos de radiologia, a energia e a carga verificam-se rotineiramente com monitores não invasivos. Um monitor não invasivo é composto, geralmente, por dois diodos idênticos e filtros de diferentes materiais (alumínio ou cobre) ou diferentes espessuras, posicionados entre os diodos e o feixe de radiação. Nos diodos são geradas correntes diferentes, que são amplificadas e depois transferidas a um microprocessador. A razão entre as leituras na saída do microprocessador pode ser utilizada para calcular o valor da tensão de pico do tubo. Mas as leituras do monitor dependem também da

forma de onda da tensão, do *ripple*, da filtração usada, das condições de medida (carga, posicionamento do monitor, etc.) [2]. Associadas a estas condições, e devido fundamentalmente ao transporte, a choques, e à variação de temperatura [3] existe no mínimo, perda de acurácia e reprodutibilidade com o tempo de uso. Portanto, recomenda-se como para qualquer instrumento de medição a verificação constante da calibração, fato que faz o procedimento demorado, porque requer dos serviços de laboratórios de calibração secundária.

Neste sentido, a espectrometria com semicondutores tipo “diodo-pin”, fornece a possibilidade de verificar a qualidade do feixe, a partir da obtenção direta do espectro, em relativamente curtos intervalos de tempo [4, 5], exigindo apenas uma calibração rápida (*in situ*) com fontes radioisotópicas, e em determinadas condições, inclusive, a leitura pode ser usada como referência para a calibração de monitores não invasivos.

Hoje são comercializados diferentes tipos de espectrômetros portáteis a preços acessíveis. O modelo XR-100T da Amptek Inc. USA, com semicondutor de telureto de cádmio (CdTe), e a interfase PX4 é um espectrômetro apropriado para caracterizar os espectros de tubos de radiologia diagnóstica e mamografia [4,5,6]. Porém, quando o detector é exposto diretamente a altos fluxos de partículas, determinados cuidados devem ser tomados para evitar danos. Em geral, dois tipos de danos podem ocorrer: danos permanentes que aparecem por exposição do detector a um alto fluxo; por exemplo, proveniente de um tubo de raios X com fins médicos, ou de fontes de radiação nuclear forte, ou quando exposto a fluxos de aceleradores; e danos temporários, que podem vir aparecer mesmo ante um fluxo moderado. Os principais indicadores que os caracterizam são a perda de resolução energética e a omissão de picos de alta energia.

Um modo de evitar o problema, quando feitas medidas em geometria de feixe direto para aplicações médicas, é procurar não ultrapassar a corrente máxima na entrada ao FET (acrônimo em inglês de *Field Effect Transistor*). Este propósito pode ser atingido usando colimadores apropriados, também fornecidos no mercado, mas geralmente a custos mais altos. A escolha do mais apropriado para uma ou varias aplicações passa por questões financeiras e, portanto deve primar o bom senso. Sendo assim, este trabalho se propôs a avaliar as características de um colimador razoável para um detector “diodo-pin” de CdTe em condições de geometria de feixe direto, que permita caracterizar, com uma técnica alternativa, o espectro de um feixe típico de radiologia diagnóstica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Base de desenho

A Amptek Inc. USA comercializa um conjunto de colimadores que podem ser acoplados a este tipo de detector para diferentes aplicações. A eleição de um ou outro jogo de colimadores, inclusive por um especialista, requer o conhecimento da função resposta do detector em determinadas condições. Uma ferramenta útil e rápida é a simulação do feixe, e o estudo da distribuição de partículas que incidem no sensor de radiação, fundamentalmente quando as geometrias de medição são complicadas, e os materiais usados complexos.

O sistema de colimação para um detector tipo “diodo-pin” como o CdTe, comercializado pela AMPTEK (ver figura 1), é constituído basicamente por um cilindro de 3,8 cm de comprimento (“Brass spacer”), um cilindro externo de aço inox, que acopla ao detector, e dois discos de Tungstênio (uma liga HD17 com 90% W, 6% Ni, 4% Cu). Para garantir a boa colimação, a firma comercializa ainda um sistema para alinhamento do feixe. Segundo a espessura e o diâmetro da fenda dos discos, o detector e a eletrônica acoplada, permitirão a obtenção de um espectro, sem degradar a resolução energética e temporal do sistema espectrométrico. O fabricante fornece sete tipos de discos, de 1,0 mm de espessura de W com abertura de fenda de 25,0 μm ou 50,0 μm , e discos de 2,0 mm de espessura de W, com 100,0 μm , 200,0 μm , 400,0 μm , 1000,0 μm ou 2000,0 μm . Os discos e espaçador têm um diâmetro de 1,6 cm.

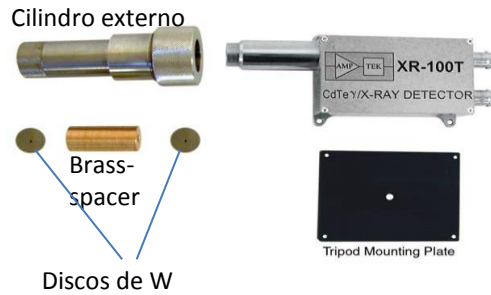


Figura 1. Sistema de colimação comercializado pela Amptek SA (na esquerda) e detector CdTe, modelo XR-100T com a placa de sustentação (na direita). A figura foi tomada do manual do fabricante.

2.2 Condição inicial

A energia depositada no telureto de cádmio ($E_{detector}$) produzida pela interação de um feixe de raios X de espectro contínuo, pode ser estimada se conhecido o produto do número de pares elétrons buracos (N_{e-b}) que por unidade de tempo [s] estão se formando, e a energia necessária para formar um par no detector (ε).

Sendo $\varepsilon = 4,43$ eV para o CdTe, e conhecida a corrente máxima que admite o FET ($1\mu\text{A}$):

$$1\mu\text{A}/q_e = 10^{-6}[\text{C/s}] \frac{1e^-}{1,6 \times 10^{-19}[\text{C}]} = 6,3 \times 10^{12} e^-/\text{s} \quad (1)$$

Estima-se a energia máxima depositada no detector, segundo exigências do fabricante:

$$E_{detector} = \varepsilon \cdot N_{e-b} = 2,8 \cdot 10^{13} \text{ eV/s} \quad (2)$$

2.3 Características gerais da simulação.

A estimativa da energia depositada no detector, quando usado o colimador, pode ser obtida por simulação do transporte de partículas emitidas de uma fonte de raios X de espectro contínuo, as quais incidem diretamente num detector (neste caso de $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}$), usando o código MCNPX versão 2.5 [7].

O MCNPX permite obter a energia depositada mediante a variável de saída, *Tally *F8*. A rigor, esta variável dá a energia depositada por fóton emitido pela fonte, em um detector virtual pontual. Corrigindo esse valor pelo número total de fótons emitidos na fonte, obtém-se a distribuição de intensidades por intervalo de energia.

Para fazer a simulação, o arquivo de entrada do MCNPX precisa de uma descrição dos parâmetros do feixe (fonte de radiação, energia, geometria e dados dos materiais do alvo), além da geometria de irradiação do detector (distância fonte-detector, dimensões dos materiais interpostos entre o feixe e o detector (colimador), assim como a caracterização do próprio detector (dados do CdTe e da janela de Be).

2.4 Definição dos materiais.

Para simplificar as características de desenho do colimador, e sem possibilidades de aquisição de discos de W apropriados, foi suposto que uma cápsula oca de aço inox, em forma cilíndrica, em geometria similar ao comercializado pelo fabricante, serviria como colimador (ver figura 1). Em lugar de discos de W, aço inox com uma espessura de 2,0 cm na parte frontal, e diferentes aberturas de fenda bastariam para colimar o feixe, e observar os picos característicos do alvo de Bremsstrahlung. A escolha do material com Z efetivo da ordem do ferro tem a desvantagem de elevar as contribuições das interações na região do contínuo, minimizando-se as interações por

fotoefeito, devido ao comportamento da seção de choque de interação eletromagnética para a faixa de energia entre 0,0 e 150,0 keV. Isto piora a eficiência do detector e nos coloca diante de novas preocupações; mas soluciona o problema de minimizar os danos por radiação. Foram simulados colimadores com diferentes diâmetros de fenda (500um, 700um, 1 mm, 1,5 mm)

2.5 Definição da fonte de excitação.

Para evitar simular o processo todo com o MCNPX, desde a aceleração de elétrons até o alvo de Bremsstrahlung, e nos concentrar apenas na fonte própria de raios X, estimou-se com o código SP-78 [8], a distribuição de intensidades de raios X por intervalo de energia da fonte de excitação, quando um feixe de elétrons incide com energia máxima de 150,0 keV sobre um alvo de W, sem filtração inerente de alumínio no tubo. Integrando o espectro de saída do código SP-78, obtém-se facilmente o número de fótons que por mm^2 e por mAs foram produzidos pela fonte de tungstênio, sem filtragem adicional, porém a uma distância de 750,0 mm do ponto focal (por condição própria que impõe o código SP-78). A intensidade total de fótons a 750,0 mm do ponto focal dessa fonte foi estimada em $(9,2 \times 10^9) I_{\text{nominal}}$ [fótons/mAs], onde I_{nominal} [mA] é a corrente aplicada no painel de controle do console do tubo.

Impondo como condição (para o MCNPX) que a distância entre o ponto focal (no alvo de W) e a entrada do colimador é 1 m, a fonte de excitação pode ser considerada plana (em forma de disco) com um $r=1,5 \text{ cm}$, de forma tal que coincida com o raio da seção transversal do colimador. Nestas condições, supõe-se que possa ser feita a medida direta do espectro com o CdTe sem perigo de provocar danos.

Lembrando que a intensidade total de fótons emitidos pela fonte é usada para corrigir *F8, e obter a energia depositada no detector de CdTe (E_{detector}), temos finalmente que a condição a testar é:

$$(*F8)9,2 \times 10^9 \left[\frac{1}{\text{mAs}} \right] I_{\text{nominal}} [\text{mA}] \leq 28 \times 10^{12} \left[\frac{\text{eV}}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

Com este valor e diferentes cargas estima-se, por aproximações sucessivas, a espessura de aço inoxidável necessária para proteger o detector, e simultaneamente o diâmetro da fenda (furo) que permite a colimação do feixe.

Na Figura 2 é representado um dos arranjos que definem a geometria usada no MCNPX nos cálculos:

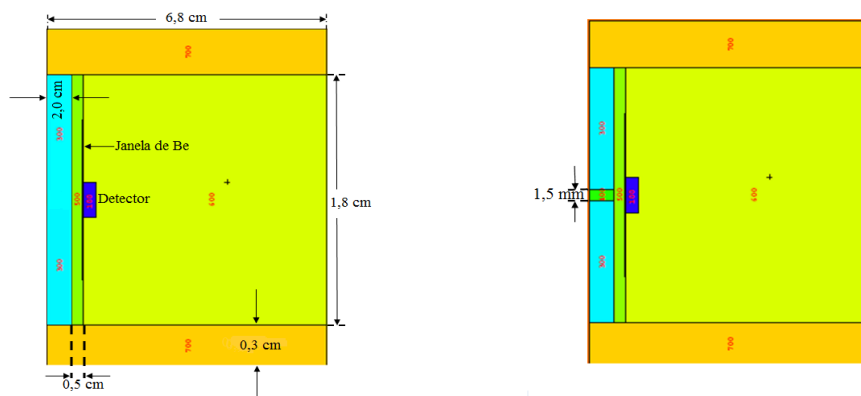


Figura 2. Esquema gerado para o MCNPX da geometria de colimação para o feixe de Raios X. A figura no lado esquerdo refere-se à configuração de incidência do feixe com atenuador de 2,0 cm de aço inox sem fenda, e a da direita com atenuador de 2,0 cm de aço inox e com uma abertura de 1,5 mm para a fenda.

2.6 Verificação experimental

O detector de CdTe tipo “diodo-pin”, com dimensões $3 \times 3 \times 1$ mm³ (modelo Amptek XR 100T), cujas características típicas tais como eficiência, resolução e espessura da camada morta foram determinadas previamente por Soares C. , e reportadas em [9], foi colimado com aço inox de 1,5 mm de abertura, e localizado na frente do feixe de raios X (Equipamento Radiológico Fixo, Marca: Salgado&Hermann/RAICOM, Modelo RC/300D). O conjunto colimador- detector foi alinhado em relação à direção de incidência do feixe com ajuda da luz indicadora do ponto focal do tubo (com a mínima abertura do campo de raios X), a qual devia coincidir com a abertura do colimador, e um sistema de referência posicionado na caixa do detector (formado por pinos). Para controlar a focalização do feixe e ter apenas um ponto luminoso nos auxiliamos dos colimadores internos de chumbo que possui o tubo de raios X. Para distâncias foco-detector de 1,0, 1,5 e 2,0 m, foram coletados espectros diferenciais de altura de pulsos com diferentes potenciais de aceleração e cargas do feixe. Considerando as baixas intensidades estimadas por simulação para abertura de colimação de 1,5 mm, e os testes prévios realizados com cargas de 50 mAs, foram finalmente obtidos espectros de altura de pulsos, com carga duas vezes maior (100,0 mAs), e diferentes kVp.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são mostrados os espectros de altura de pulsos simulados, a partir da proposta de desenho de um atenuador de aço inox com 2,0 cm de espessura na parte frontal do detector, e 1,0 mm de diâmetro de abertura de colimação, localizado na frente de um feixe com uma carga de 50,0 mAs e tensão de aceleração de 150,0 kVp. Para conseguir reproduzir os espectros de altura de pulsos com o MCNP4X, foi considerada uma resolução de 1,33 keV para a energia de 122,0 keV do Co-57, e uma eficiência de 90 % para a energia de 59,0 keV do W (baseado em dados reportados pelo fabricante).

Na figura, o chamado “espectro incidente” caracteriza o espectro de excitação emitido por uma fonte plana de raios X a 250,0 mm da parte frontal do colimador, sem filtração intrínseca de Alumínio. O espectro de altura de pulsos de intensidade mais baixa (chamado “Altura de pulso sem furo”) representa a estimativa feita com o atenuador de aço inox, sem fenda ou furo de colimação. O gráfico intermediário considera a colimação por uma abertura de 1,0 mm. Nesta figura é possível notar ainda os picos característicos na região de baixas energias devido à excitação das linhas L do W, (embora não estejam bem definidos), caso o tubo não tenha filtração de Alumínio. Também são mostrados os picos característicos K_{α} e K_{β} do W em 59,31 e 67,23 keV.

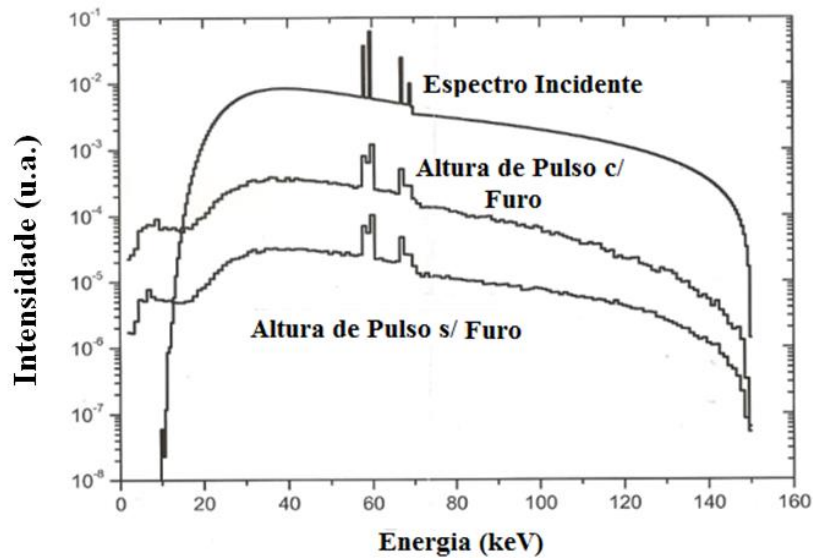


Figura 3. Espectro de altura de pulso simulado a partir do colimador que foi construído para medir os espectros diretos do tubo de raios X.

A modo de exemplo é mostrado um espectro experimental obtido com o detector colimado de CdTe em geometria de feixe direto, proveniente de um tubo com potencial de aceleração de 100,0 kVp, e com carga de 100,0 mAs, localizado a 1,0 m de distância do ponto focal. A Figura 4 mostra a distribuição diferencial de altura de pulsos experimental, obtido com a interface (modelo PX4) com os seguintes parâmetros: Ganho: 20,91, Tempo morto: 10%, pick time: 0,8.

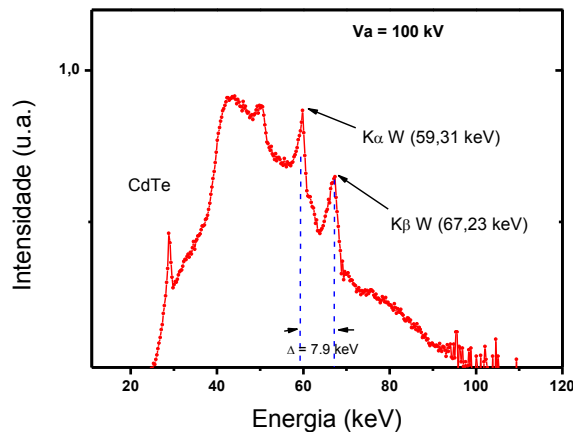


Figura 4. Espectro medido em geometria de feixe direto para 100,0 kVp com o colimador construído.

A carência de um dispositivo preciso para alinhamento do feixe provoca mudanças no ângulo sólido com que o detector enxerga ao feixe, o qual afeta a eficiência de detecção. Também, partículas que incidem oblíquas à fenda podem ser atenuadas parcialmente no aço, fato que também piora a eficiência e finalmente a intensidade. Como esperado, a utilização de aço inox como colimador e, fundamentalmente, problemas no alinhamento preciso do feixe, prejudicaram a estatística dos picos característicos e a forma geral do contínuo. Porém, o espectro mostra as principais características do tubo usado: as linhas características K_{α} e K_{β} do Tungstênio, o Compton da linha K_{α} do W, perto de 50 keV, a energia efetiva (de $1/3$ a $1/2$ da energia máxima do espectro, a qual coincide com o valor mais provável da distribuição), e a

existência de filtragem intrínseca de Al no tubo do laboratório do CPqCTR. A energia final (kVp) ou tensão de aceleração aplicada aos elétrons foi determinada ajustando os valores de altura de pulsos na região do “tip”, logo depois dos picos K_{α} e K_{β} do W, supondo uma função para o bremsstrahlung que segue a lei $1/\sqrt{E}$. A energia efetiva foi determinada também pelo método da camada semiredutora [9], verificando-se similar.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foram apresentadas as potencialidades da simulação teórico-computacional de transporte de radiações para o desenho de um dispositivo auxiliar, que garante a durabilidade de um semicondutor de CdTe, em medidas diretas de espectros de tubos de radiodiagnóstico. Mostra que a espectrometria com base a equipamento portátil fornece uma alternativa, na estimativa de grandezas que definem a qualidade de feixes de radiodiagnóstico, principalmente em ausência de monitores não invasivos calibrados, ou eventualmente, para nos auxiliar na própria calibração destes. Com tudo, este trabalho constitui um passo importante para a inserção da universidade nos problemas mais urgentes que possui o sistema público de saúde na região, especialmente, nos serviços de radiodiagnóstico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido pela CAPES no Edital Pro - equipamentos 2009, para a aquisição do espectrômetro, e o apoio recebido da FAPESB na aquisição dos equipamentos de raios X instalados no laboratório de Radiologia do CPqCTR. O autor Climério Soares agradece o apoio financeiro recebido pela CAPES durante o mestrado.

-
1. Nicholas W.M. Ritchie, Spectrum Simulation in DTSA-II. *Microsc. Microanal.* 15, 454–468, 2009.
 2. W. Jackson, et al. Measurement of Kilovoltage by the Penetrameter-Theoretical Aspects. *Phys. Med. Biol.*, Vol. 20, No. 2, 268-281, 1975.
 3. M.C.S. Fragozo et al., Padronização de feixes de raios-X para uso em radiologia Odontológica. *Scientia Plena* 4, 114816, 2008.
 4. M.C. Silva, P. Lammoglia, S.B. Herdade, et al. Determination of the potential applied to X-rays tubes through the bremsstrahlung spectrum obtained with a PIN photodiode. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 16, n. 1, p. 13-20, 2000.
 5. Satoshi Miyajima. Thin CdTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy. *Med. Phys.* 30,5, 2003.
 6. Jaquiel S. Fernandes, Carlos R. Appoloni, et. al. Aplicabilidade de um sistema portátil de espectrometria de raios X e raios gama in situ. *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005*. ISBN: 85-99141-01-5.
 7. D. Pelowitz (Editor). MCNPX TM User's manual. Version 2.5.0. Los Alamos National Laboratory Report, LA-CP-05-036, 2005.
 8. K.Cranley et al., Catalogue of diagnostic X ray spectra and other data. *Institute of Physical Sciences in Medicine*, 1997.
 9. C. Soares. Caracterização experimental em geometria de feixe direto de um tubo típico de radiologia diagnóstica [manuscrito]. *Dissertação de Mestrado. UESC- 616.0757 S676car 2012 D*, 2012.