

Caracterização de um Espectrômetro Compton para Medição de Espectros de Feixes de Fótons de Energia Alta

Characterization of a Compton Spectrometer for measurement of High Energy Photon Beam Spectra

John Peter O. Manrique, Alessandro M. Costa

Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (USP), Ribeirão Preto (SP), Brasil.

Resumo

O método de espectrometria Compton apresenta-se como uma técnica eficiente para medição de espectros de feixes de fótons de energia alta que são produzidos em aceleradores lineares clínicos e unidades de radioterapia de Co-60, usadas em tratamento de pacientes com câncer. Neste trabalho foi feita a caracterização de um espectrômetro Compton com o objetivo de medir o espectro de altura de pulsos (PHS, do inglês *Pulse Height Spectra*) para uma unidade de Co-60 de uso clínico, com a finalidade de obter o espectro de fluência de fótons para posteriormente aplicar este método na medição e reconstrução do espectro de bremsstrahlung de um acelerador linear clínico. Previamente foi feita a caracterização de um detector de NaI(Tl), obtendo as funções de resposta em energia para o espectrômetro Compton. Aqui apresentamos a medição dos espectros de altura de pulsos em configuração Compton para energias de raios X de 70 a 100 kV com ângulo Compton de 90° , as quais foram feitas com o fim de obter a resposta do espectrômetro a estas energias, para depois disso medir o espectro de altura de pulsos para a unidade de Co-60 em diferentes ângulos Compton.

Palavras-chave: Espectrometria de raios X; Espectrometria Compton; Função resposta; Feixes clínicos; Radioterapia.

Abstract

The Compton spectrometry method is presented as an efficient technique for measuring high energy photon beam spectra that are produced in clinical linear accelerators and Co-60 radiotherapy units used in the treatment of cancer patients. In this work the characterization of a Compton spectrometer with the objective of measuring the Pulse Height Spectrum (PHS) was performed for a Co-60 unit of clinical use, in order to obtain the fluence spectrum of photons to later apply this method in the measurement and reconstruction of the bremsstrahlung spectrum of a clinical linear accelerator. Previously a characterization of a NaI (Tl) detector was performed, obtaining the energy response functions for the Compton spectrometer. Here we present the measurement of the pulse height spectra in a Compton configuration for X-ray energies of 70 to 100 kV with Compton angle of 90° , which were made in order to obtain the response of the spectrometer to these energies, thereafter was made the measuring of the pulse height spectra for the Co-60 unit at different Compton angles.

Keywords: X-ray spectrometry; Compton spectrometry; Response function; Clinical beams; Radiotherapy.

1. Introdução

O espectro de fluência de fótons¹ de uma unidade de tratamento clínico, seja uma unidade de Co-60 ou acelerador linear, é uma quantidade fundamental requerida para fazer o cálculo preciso das doses tridimensionais a serem aplicadas ao paciente em radioterapia. A medição direta do espectro de fluência de fótons é difícil de fazer no ambiente clínico, devido às altas taxas de doses entregues pelas unidades de tratamento clínico que conduzem ao empilhamento de pulsos no detector e saturação induzida pelo tempo morto, e devido também aos grandes intervalos de energia dos fótons produzidos que levam a uma eficiência baixa do detector. Detectores cintiladores de iodeto de sódio ou detectores semicondutores de germânio têm sido utilizados, no feixe direto^{2,3,4}, ou por espectrometria Compton^{5,6,7,8}, com objetivo de determinar estes espectros. Medições destes espectros usando

espectrômetros Compton têm uma vantagem, pois o detector é mantido fora do feixe direto intenso. A taxa de contagem produzida após o feixe ter sido espalhado por uma folha de metal é reduzida para um nível adequado para a detecção de alta resolução⁹. Com esta técnica, o espectro primário pode ser obtido sem perturbações devido à colimação artificial primária ou dessintonização extrema. O objetivo deste trabalho foi medir o espectro de altura de pulsos (PHS, do inglês *Pulse Height Spectra*) de uma unidade de teleterapia de Co-60 utilizando um espectrômetro Compton com detector cintilador de NaI(Tl). Para alcançar este objetivo foi realizada a caracterização de um detector de NaI(Tl) e do espectrômetro Compton, com base em medições experimentais e simulação Monte Carlo, para obter fatores de correção para eficiência intrínseca e resolução em energia, e também as funções de resposta em energia para

nosso espectrômetro. A partir do PHS medido, podemos obter o espectro de fluência de fótons verdadeiro usando uma técnica de deconvolução apropriada junto com a matriz de resposta para o sistema de detecção previamente construída^{10,11}.

1.1. Espectrometria Compton

O espalhamento Compton está governado pelas leis da cinética e a dinâmica de três corpos considerando os raios X incidentes, o elétron de interação assim como o núcleo do átomo que contém este elétron, simplificações do modelo são feitas com o fim de produzir resultados de acordo ao experimento considerando que o fóton interage com um “elétron livre” chegando a ser um problema de dois corpos cuja solução é relativamente mais fácil. Assim para espalhamento Compton, usaremos as equações obtidas a partir da conservação da energia, do momento e do uso da teoria da relatividade^{1,9} para a energia dos fótons espalhados em função da energia dos fótons incidentes,

$$E' = \frac{E}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

em que $E = h\nu$ e $E' = h\nu'$ são as energias para o fóton incidente e espalhado respectivamente, θ é o ângulo de espalhamento e $\gamma = h\nu/mc^2$ é o fator de redução da energia, A energia está relacionada com o comprimento de onda pela relação $E = hc/\lambda$ com h como a constante de Planck e c , a velocidade da luz e sendo $\nu = c/\lambda$ a frequência associada à radiação. A probabilidade de espalhamento por efeito Compton é dada pela seção de choque diferencial de Klein-Nishina por elétron^{1,9} que pode ser escrita como:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left(\frac{(1 + \cos^2\theta)}{2} \right) \frac{1}{(1 + \gamma(1 - \cos\theta))^2} \times \left[\frac{\gamma^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)(1 + \gamma(1 - \cos\theta))} + 1 \right] \quad (2)$$

em que $r_0 = 2.81 \times 10^{-13}$ cm, é o raio clássico do elétron e a seção de choque diferencial de Klein-Nishina é dada em unidades de cm^2/sr .

2. Materiais e Métodos

Foi usado um detector de cristal cilíndrico de NaI(Tl) de $7,62 \times 7,62$ cm (diâmetro×comprimento), associado ao analisador de altura de pulsos multicanal MCB-DSPEC jr 2.0 da ORTEC que é acoplado a um computador para a medição de todos os espectros de altura de pulsos neste trabalho. Previamente fizemos a calibração em energia de nosso sistema analisador de altura de pulsos considerando as fontes radioativas padrão descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Fontes de calibração utilizadas

Fonte Radioativa	Energia (keV)	Probabilidade de Emissão (%)
Ba-133	81,00	34,06
	356,02	62,05
Cs-137	661,66	85,10
Co-60	1173,24	99,97
	1332,5	99,98

A calibração em energia relaciona a altura do pulso no PHS e a correspondente energia da fonte que é medida dando a relação canal por energia.

2.1. Caracterização do espectrômetro Compton

Nosso espectrômetro Compton consiste de uma estrutura móvel com rodas sobre a qual foi colocada uma blindagem de chumbo para proteger o detector de NaI(Tl) da radiação espalhada; a blindagem está conectada a um goniômetro para medir o ângulo Compton (Figura 1). O sistema move-se em diferentes graus de liberdade para variar a posição e ângulo do eixo de detecção com respeito ao eixo do isocentro da fonte. Possui um sistema de nivelamento mecânico para dar capacidade de alinhamento horizontal, garantindo o nivelamento do eixo do sistema de detecção em relação ao eixo do isocentro da fonte de radiação e usa um sistema com laser para o alinhamento fino do eixo do sistema de medição com o eixo da fonte de radiação. Este sistema de espectrometria foi construído em colaboração com a oficina mecânica do Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

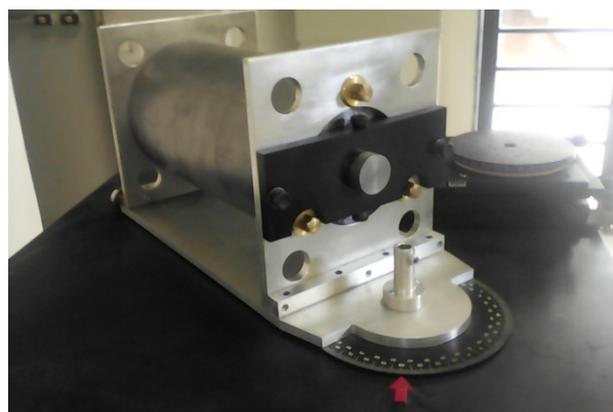


Figura 1. Frente da blindagem e goniômetro do sistema de espectrometria Compton.

Para testar o correto funcionamento de nosso espectrômetro Compton se fizeram testes mecânicos do sistema, tais como testes da movimentação e estabilidade no posicionamento da estrutura móvel, teste de alinhamento usando um sistema laser projetado como um cilindro que tem quatro parafusos que permitem maior grau de liberdade para o alinhamento a partir de fora da blindagem, garantindo ótimo alinhamento na direção da maior intensidade do laser, que atravessa um furo cilíndrico de diâmetro 2 mm na blindagem com um comprimento de 20 cm e viaja atravessando mais 5 cm de comprimento de um furo de 1 mm de diâmetro num segundo colimador cilíndrico de 5 cm de comprimento por 5 cm de diâmetro na face frontal da blindagem.

2.2. Medição do PHS para raios X do Isovolt Titan E

Para verificar o correto funcionamento de nosso sistema de espectrometria Compton foram feitas medições dos espectros de altura de pulsos para

uma unidade de raios X de baixa energia *Isovolt Titan E*, GE Inspection Technologies, que conta com anodo de tungstênio para potenciais de 70 kV, 80 kV e 100 kV, usando um espalhador cilíndrico de acrílico de 0,8 cm de diâmetro por 1 cm de espessura em ângulo Compton de 90° .

2.3. Medição do PHS do Theratron-780

Com o propósito de medir o espectro de altura de pulsos de uma unidade de cobaltoterapia modelo Theratron-780 usamos o espectrômetro Compton qual esta composto pelo detector de NaI(Tl) com a blindagem de chumbo e nosso analisador de altura de pulsos MCB-DSPEC jr 2.0 da ORTEC unido a um computador. O desenho experimental para medição do espectro da unidade Theratron-780, usando nosso sistema de espectrometria Compton tem como base a geometria da referencia [6] como mostrado na figura 2.

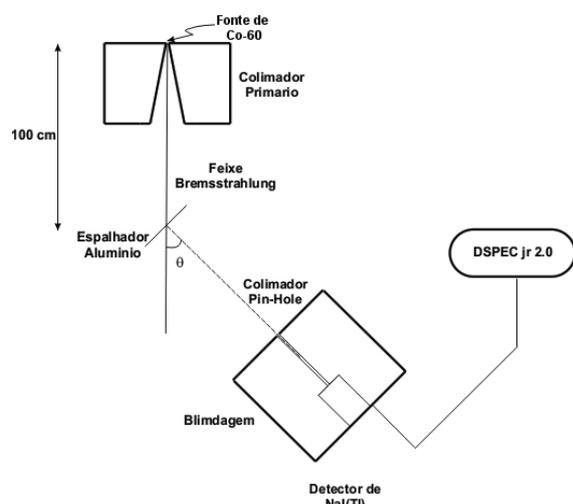


Figura 2. Diagrama esquemático da medição do PHS para a máquina de Co-60 Theratron-780 com espectrômetro Compton

Usamos uma geometria Compton com um espalhador de alumínio de espessura total de 4,2 mm consistindo de folhas de alumínio de 7 mm, cada uma. O espalhador foi posicionado a 100 cm da posição da fonte de Co-60 e a 178 cm da face do detector em ângulo Compton de 15° para um tamanho de campo de radiação de $5 \times 5 \text{ cm}^2$ a 100 cm da fonte. Fizemos três medições usando o espalhador de alumínio mantendo os mesmos parâmetros de irradiação para coletar o PHS produzido pelo feixe espalhado pelas folhas de alumínio e em seguida, para medir as contagens de fundo para o ângulo Compton correspondente, retiramos o espalhador de alumínio e colocamos uma blindagem de chumbo de espessura adequada para cobrir o furo de entrada da radiação para o detector, procedendo a manter os parâmetros de irradiação como quando estava presente o espalhador. O analisador de altura de pulsos foi configurado previamente a 511 canais com *baseline restore* em *fast*.

3. Resultados

Como resultado da calibração em energia usando as fontes monoenergéticas padrão da tabela 1 obtivemos a relação canal-energia correspondente a uma linha reta com coeficiente de ajuste linear da reta $m = (3,57 \pm 0,02) \text{ keV/canal}$ para a configuração de nosso equipamento, com um coeficiente de correlação de $r^2 = 0,99992$. Nas figuras 3 a 5 observa-se o espectro de altura de pulsos medidos para as energias de 70 kV, 80 kV e 100 kV, do tubo de raios X *Isovolt Titan E*. Pode-se observar uma boa correlação entre a energia máxima correspondente a cada espectro com respeito à calibração feita com as fontes padrão.

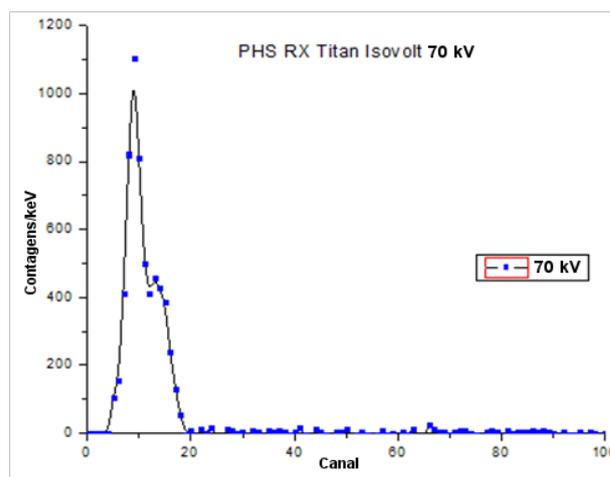


Figura 3. Espectro de Altura de Pulsos PHS para 70KV.

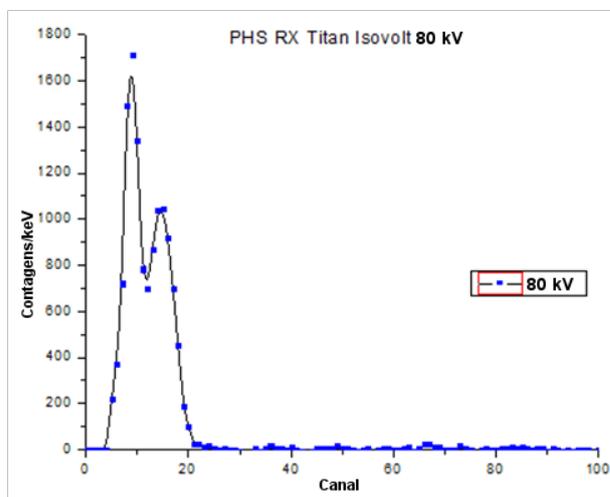


Figura 4. Espectro de altura de Pulsos para 80 kV.

A figura 6 mostra os resultados para as três medições do espectro de altura de pulsos da unidade de Co-60 Theratron-780, nas curvas em azul, vermelho e verde. A medição das contagens de fundo para o correspondente ângulo Compton é mostrada em preto. Pode-se observar uma boa concordância na definição dos picos para a fonte de Co-60 obtidas por espectrometria Compton. Estas medições serão posteriormente processadas para obter o espectro verdadeiro para a fonte de Co-60 Theratron-780 usando um método de deconvolução apropriado.

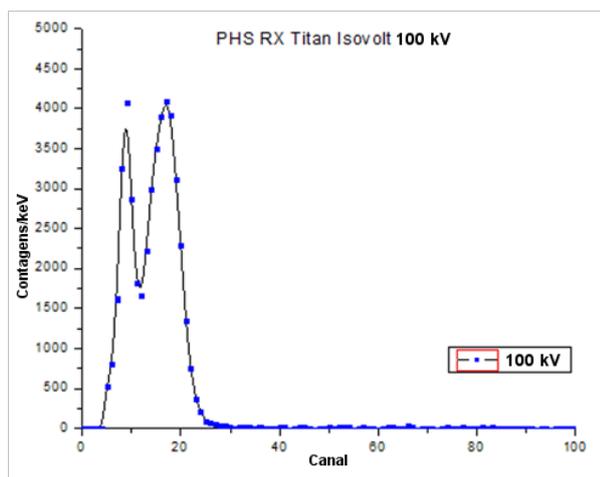


Figura 5. Espectro de altura de pulsos para 100 kV

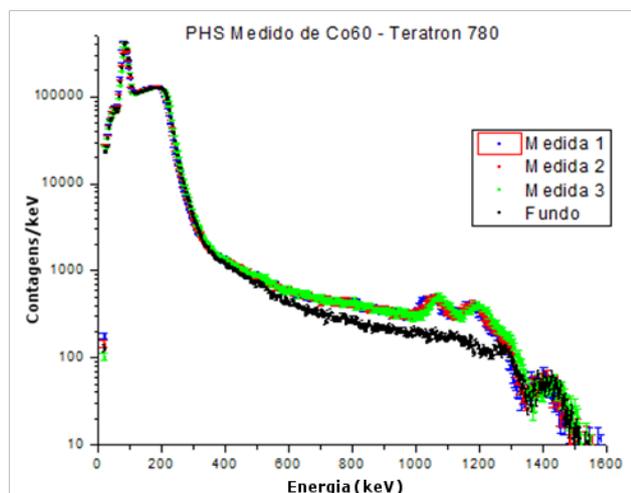


Figura 6. Espectro de altura de pulsos para uma unidade de Co-60 Theratron-780, medida com o espectrômetro Compton para ângulo de 15° , em preto a medição das contagens de fundo.

4. Discussão

Observa-se uma boa definição dos picos medidos para o Co-60 em configuração Compton e uma boa correlação do deslocamento do espectro com relação ao ângulo Compton conforme as previsões teóricas. Com base aos resultados obtidos podemos considerar que nosso método de posicionamento e alinhamento usado é adequado para garantir a calibração do espectrômetro em relação à energia. Pode-se verificar o processo de calibração do espectrômetro Compton realizado com as fontes de calibração padrão, com as medições em configuração Compton dos espectros de altura de pulsos para energias de kilovoltagem de raios X de 70, 80, 100 kV e usar adicionalmente a fonte de Cs-137. De acordo com os resultados apresentados podemos concluir que o método de espectrometria Compton usando detector de NaI(Tl) pode ser usado para medição de espectros de feixes de fótons de energia alta de aceleradores lineares clínicos.

5. Conclusões

Neste trabalho foi feita a caracterização de um espectrômetro Compton com o objetivo de medir o espectro de altura de pulsos para uma unidade de Co-60 de uso clínico, com a finalidade de obter o espectro de fluência de fótons para assim poder

aplicar este método na medição e reconstrução do espectro de bremsstrahlung de um acelerador linear clínico.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro parcial. Agradecemos também à empresa Metrobras pela disponibilização da unidade de Co-60 utilizada neste trabalho

Referências

1. Attix F H. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
2. Brownridge J, Samnic S, Stiles P, Tipton P, Veselka J, et al. Determination of the photon spectrum of a clinical accelerator. Medical Physics, v. 11, n. 6, p. 794–796, 1984.
3. Faddegon BA, Ross CK, Rogers DWO. Forward-directed bremsstrahlung of 10 to 30 MeV electrons incident on thick targets of Al and Pb. Medical Physics, v. 17, n. 5, p. 773–785, 1990.
4. Sandifer CW, Taherzadeh M. Measurement of linac thick-target bremsstrahlung spectra using a large NaI scintillation spectrometer. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 15, n. 6, p. 336–345, 1968.
5. Bentley RE, Jones JC, Lillicrap SC. X-Ray Spectra from Accelerators in the range 2 to 6 MeV. Physics in Medicine and Biology, v. 12, n. 3, p. 301–314, 1967.
6. Landry DJ, Anderson DW. Measurement of accelerator bremsstrahlung spectra with a high-efficiency Ge detector. Medical Physics, v. 18, n. 3, p. 527–532, 1991.
7. Levy LB, Waggner RG, McDavid WD, Payne WH. Experimental and calculated bremsstrahlung spectra from a 25 MeV linear accelerator and a 19 MeV betatron. Medical Physics, v. 1, n. 2, p. 62–67, 1974.
8. Levy LB, WAGGENER RG; WRIGHT AE. Measurement of primary bremsstrahlung spectrum from an 8 MeV linear accelerator. Medical Physics, v. 3, n. 3, p. 173–175, 1976.
9. Knoll GF. Radiation detection and measurement. 4. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
10. Sabharwal AD, Singh M, Singh B, Sandhu BS. Response function of NaI(Tl) detectors and multiple backscattering of gamma rays in aluminium. Applied Radiation and Isotopes, v. 66, n. 10, p. 1467–1473, 2008
11. Singh M, Singh G, Singh B, Sandhu BS. Energy and intensity distributions of multiple Compton scattering of 0.279-, 0.662-, and 1.12-MeV γ rays. Phys. Rev. A, v. 74, n. 042714, 2006.

Contato:

John Peter Oyardo Manrique
Alessandro Martins Da Costa
Departamento de Física - FFCLRP - USP
Av. Bandeirantes, 3900
Vila Monte Alegre
Ribeirão Preto - SP – Brasil 14040-901
Fone: +55-16-3315-4670
Fax: +55-16-3315-4887
johnp067@usp.br, amcosta@usp.br.