

Determinação da camada semirredutora e da tensão aplicada a partir de espectros emitidos por um tubo de raios X

Determination of half value layer and applied voltage from emitted spectra by an X ray tube

Josilene C. Santos¹; Alejandro H.L. Gonzales¹; Ricardo A. Terini¹; Paulo R. Costa¹

¹Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Resumo

Este trabalho descreve um método para o cálculo de camada semirredutora (CSR) e tensão de pico (kVp) aplicada ao tubo de raios X por meio de espectros medidos utilizando um detector de CdTe. São avaliados alguns parâmetros que podem influenciar na determinação dessas grandezas, tais como, tempo morto, taxa de contagens e valor de corrente anódica utilizado. Para isso, foram medidos dois conjuntos de espectros de raios X: Conjunto A, utilizando filtração de cobre de diferentes espessuras (1,8 - 5,4 mm) e mantendo fixa a corrente anódica aplicada ao tubo; Conjunto B, mantendo a filtração de cobre fixa e variando a corrente (0,5 - 3 mA). As configurações de medições dos espectros do conjunto A permitiram a avaliação da kVp e CSR para diferentes taxas de contagens e tempo morto do sistema de detecção, enquanto o conjunto B permitiu avaliar a dependência dessas grandezas com a corrente anódica do tubo. Fontes radioativas padrão foram usadas para fazer a calibração em energia do sistema espectrométrico. Os valores de tensão aplicados ao tubo foram determinados por meio de regressão linear a partir dos espectros medidos buscando o *end point* de cada um. Os valores de CSR foram determinados a partir dos espectros medidos, após sua correção por meio de um método de *stripping* implementado em ambiente Matlab®. Para comparação, a CSR também foi determinada usando uma câmara de ionização de 30 cm³ e filtros de Al de alta pureza. Os resultados mostram que é possível determinar a kVp com boa exatidão e reprodutibilidade, utilizando espectros com tempo morto de até 10%. Apesar disso, os valores obtidos apresentaram desvio de até 7 kV, para espectros medidos com mesma tensão nominal e diferentes valores de corrente, indicando a dependência entre esses dois parâmetros.

Palavras-chave: Espectrometria de raios X; Detector de CdTe; radiodiagnóstico; camada semirredutora; tensão de pico.

Abstract

This work describes a method for assessment of half value layer (HVL) and peak tube voltage (kVp) applied in an x-ray tube by means of experimental x-ray spectra measured using a CdTe detector. It was assessed some parameters that can affect the evaluation of these quantities such as dead time, count rate and tube current (mA). For this study, two sets of x-ray spectra were measured: Set A), spectra measurements using Cu filters with different thicknesses (1.8 – 5.4 mm) and fixed tube current; Set B), spectra measurements keeping a fixed Cu filtration and varying tube current (0.5 – 3.0 mA). The experimental setup for the Set A spectra measurements allowed the assessment of the HVL and kVp for different count rates and dead time in the detection system, while the Set B setup allowed to assess the dependence of these quantities with the tube current. The spectrometer was energy calibrated using standard X/γ rays radioactive sources. The tube voltage values were estimated by means of experimental measured x-ray spectra, using linear regression in order to search the end point of each spectrum. The spectra correction was performed using the stripping procedure developed for the Matlab® software and the HVL values were derived from these corrected spectra. For comparison, HVL was also determined using a 30 cm³ ion chamber and high purity Al filters. The results show that it is possible to determine the kVp with accuracy and reproducibility using spectra with dead time of up to 10%. In spite of this, the values obtained showed a deviation of up to 7 kV, for spectra measured using the same nominal tube voltage different tube current values, indicating dependence between these two parameters.

Keywords: X-ray spectrometry; CdTe detector; diagnostic radiology; half value layer; peak voltage.

1. Introdução

O espectro de radiação é a representação mais completa do feixe gerado por um equipamento de raios X¹. Porém, complexidades técnicas no processo de medições destes espectros dificultaram por muito tempo a aplicação da

espectrometria em condições clínicas para avaliar feixes de radiodiagnóstico. No entanto, com o surgimento dos sistemas de espectrometria portáteis, o uso dessa técnica tem sido ampliado, incluindo aplicações para avaliação de espectros de raios X de feixes clínicos para fins de pesquisa²⁻⁸.

Desse modo, grandezas importantes como, por exemplo, dose, tensão aplicada ao tubo e camada semirredutora, podem ser determinadas por meio de espectros de raios X.

A determinação da camada semirredutora (CSR) e da tensão de pico (kVp) aplicada ao tubo de raios X são procedimentos de grande importância em programas de controle de qualidade em equipamentos de diagnóstico por imagens, e objetivam a avaliação da calibração e do desempenho destes sistemas. Esse controle é importante uma vez que pequenas variações nos valores dessas grandezas podem produzir significativas alterações na dose absorvida pelo paciente.

A relação entre variação no potencial do tubo e variação na dose absorvida depende, entre outras variáveis, da região do corpo sob irradiação e do valor de kVp utilizado. Por exemplo, Martin, Sutton e Sharp⁹, estudaram radiografias do abdome e reportaram uma variação média na dose absorvida pelo fígado de até 13% por kV na faixa entre 60 e 70 kV.

A determinação da kVp pode ser feita eletricamente usando: (i) métodos invasivos, por intermédio de um divisor de tensão calibrado e acoplado ao circuito do tubo de raios X; (ii) métodos não-invasivos, através de medições no feixe de radiação feitas com medidores digitais portáteis de kVp. Pode-se, ainda, obter valores de kVp não-invasivamente a partir de penetrômetros¹⁰ ou dos espectros dos feixes medidos com espectrômetros compostos por detectores cintiladores ou semicondutores^{7,8}. A determinação do valor de maior energia (*end point*) do espectro medido¹¹⁻¹², estimado por meio de regressão linear nos últimos canais do espectro, pode apresentar alto grau de precisão e servir como referência para calibração de medidores invasivos ou não-invasivos de kVp¹¹. A grandeza determinada dessa forma é equivalente à chamada *tensão de pico média* ($kVp_{média}$), que é a média dos valores de pico da forma de onda de tensão aplicada ao tubo.

Juntamente com a tensão de pico, a qualidade do feixe de raios X, que está relacionada ao seu poder de penetração, é caracterizada numericamente pela camada semirredutora (CSR). A CSR pode ser definida de maneira mais completa como a espessura de material absorvedor necessária para reduzir a intensidade do feixe de raios X a 50% do valor inicial. Na prática, a determinação da CSR deve ser realizada em condições de boa geometria, ou seja, com feixe suficientemente estreito para evitar que fótons espalhados no absorvedor atinjam o detector¹. O valor de CSR depende da tensão aplicada e da filtração total do tubo. O método de referência para medição da CSR na faixa de energias de diagnóstico por imagem utiliza uma câmara de ionização calibrada e filtros de Al ou Cu de alto grau de pureza¹³. Alternativamente, é possível estimar a CSR de feixes de raios X a partir dos espectros medidos, após sua adequada

correção e conversão para unidades de kerma no ar¹⁴.

Este trabalho descreve um método para o cálculo de camada semirredutora (CSR) e tensão de pico (kVp) aplicada ao tubo de raios X, por meio de espectros medidos utilizando um sistema de espectrometria portátil com detector de CdTe. Uma vez que os espectros de radiação podem fornecer uma grande quantidade de informações dos feixes produzidos para uso clínico, a metodologia apresentada nesse estudo tem potencial para ser aplicada na otimização e controle de qualidade avançados de sistemas de radiodiagnóstico.

2. Materiais e Métodos

Espectros de raios X foram medidos em diferentes *setups* a fim de analisar a dependência dos espectros com a taxa de contagem e tempo morto, além de avaliar a CSR e a kVp para diferentes valores de corrente (mA) e carga constante (mAs).

Os feixes de raios X medidos neste trabalho foram produzidos por um equipamento modelo Smart 300 HP (Yxlon LTD, Copenhagen), com anodo de tungstênio, e que opera com potencial constante.

Todos os espectros de raios X utilizados para esse estudo foram medidos utilizando um espectrômetro com detector de CdTe, modelo XR-100T (Amptek Inc., Bedford, MA, USA), com colimador de tungstênio de 2 mm de espessura e orifício de 2 mm de diâmetro, posicionado a 5 m do ponto focal do tubo, conforme indicado na Figura 1. O espectrômetro foi previamente calibrado em energias utilizando fontes radioativas, emissoras de raios X e gama, de ¹³³Ba, ²⁴¹Am e ¹⁵²Eu.

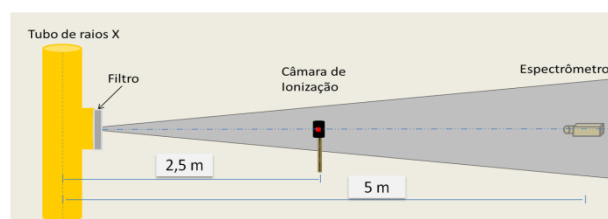


Figura 1: Posiciona dos equipamentos de medição, espectrômetro e câmara de ionização, com relação ao ponto focal do tubo de raios X utilizado.

2.1. Determinação da tensão aplicada ao tubo

A tensão aplicada ao tubo (em kV) foi determinada a partir do valor numérico do *end point* dos espectros medidos (em keV). Este por sua vez, foi determinado por meio de um ajuste linear, pelo método dos mínimos quadrados, realizado no final de cada espectro medido, considerando um intervalo de 20 canais do espectro^{11,12} (Figura 2).

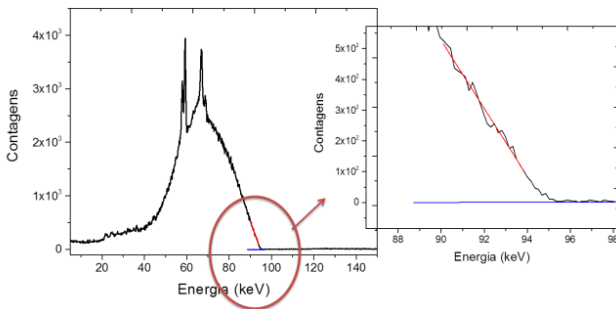


Figura 2: Espectro de raios X medido (100 kV, 120 mAs, 1,8 mmCu) com destaque nos canais utilizados para a determinação do end point^{11,12}

Para avaliar a kVp, foram utilizados dois conjuntos de espectros de feixes de raios X. O primeiro, nomeado como **conjunto A**, é composto por espectros gerados com tensão nominal aplicada de 100 kVp, corrente de 3 mA e tempo de exposição de 40 s. Foram produzidos feixes filtrados por diferentes espessuras de cobre (1,8 – 5,6 mm) adicionado a uma filtração fixa de 4 mm de alumínio. O uso de diferentes espessuras de Cu como filtração permitiu produzir espectros com diferentes taxas de contagem e tempo morto. Desse modo, foi possível avaliar a dependência da kVp, estimado por meio do *end point*, com esses parâmetros. O segundo conjunto de espectros, nomeados como **conjunto B**, foi medido utilizando filtração fixa de 4 mm Al e 1,8 mm Cu, mantendo constante a tensão nominal em 100 kVp e uma carga de 120 mAs, para seis diferentes combinações de corrente (0,5 – 3 mA) e tempo (40 - 240 s).

2.2. Camada semirredutora (CSR)

Para a determinação da CSR, os espectros medidos foram corrigidos em relação à ocorrência de escape de fótons de fluorescência e efeito Compton no volume sensível, além da variação com a energia da eficiência de absorção dos fótons pelo detector¹⁵, utilizando uma rotina desenvolvida em ambiente MatLab® R2011a (The MathWorks Inc., USA).

Os espectros de raios X corrigidos foram representados em unidades de fluência de fótons, $\varphi(E)$. Utilizando dados de coeficientes mássicos de transmissão de energia para o ar, $(\mu_{ar}(E)/\rho_{ar})_{tr}$, fornecidos pelo NIST¹⁶ e os espectros de fluência, foi determinada a distribuição espectral de kerma no ar, conforme a equação 1:

$$K_{ar}(E) = \varphi(E) \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{ar}(E)}{\rho_{ar}} \right)_{tr} \quad (1)$$

Calculando, analiticamente, a atenuação por diversas espessuras de alumínio desse feixe corrigido, a rotina constrói uma curva de transmissão e obtém a espessura (CSR) que faz a intensidade do feixe (em mGy) cair pela metade.

Para comparação, a CSR foi também medida diretamente para alguns dos feixes: com tensão nominal de 100 kV, filtração 4,0 mm Al + 1,8 mm Cu,

e correntes no tubo de 1,5 e 3,0 mA. Para isso, mediu-se, o valor de kerma no ar a 5 m do tubo com uma câmara de ionização PTW modelo TW23361 de 30 cm³ com eletrômetro PTW UNIDOS E (PTW Inc., Freiburg, Germany), ambos calibrados em laboratório metrologicamente rastreado, para algumas espessuras de alumínio de alta pureza situadas a meio caminho entre a fonte e o detector. Tomando-se os valores de K_{ar} mais próximos da metade do valor obtido para espessura nula, calculou-se a CSR através da equação (2), tal como sugerido para testes de controle de qualidade no Brasil¹⁷.

$$CSR = \left\{ \left[X_1 \ln \left(\frac{2K_2}{K_0} \right) - X_2 \ln \left(\frac{2K_1}{K_0} \right) \right] / \left[\ln \left(\frac{K_2}{K_1} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

onde K_1 e K_2 são os valores de kerma no ar medidos com a câmara após as espessuras X_1 (ligeiramente menor que a CSR) e X_2 (ligeiramente maior que a CSR) de filtros de Al situados entre tubo e câmara, e K_0 é o valor de kerma no ar medido sem filtração de Al.

Os valores médios de K_{ar} lidos no eletrômetro foram corrigidos para a pressão atmosférica e a temperatura de referência.

3. Resultados

3.1. Valores de kVp determinados pelos espectros

A kVp foi avaliado utilizando os dois conjuntos de espectros: o primeiro com corrente fixa e filtração variável (conjunto **A**) e o segundo, com filtração fixa e corrente variável (conjunto **B**). A Figura 3 apresenta os espectros de raios X do conjunto A, que foram medidos para diferentes filtrações de Cu.

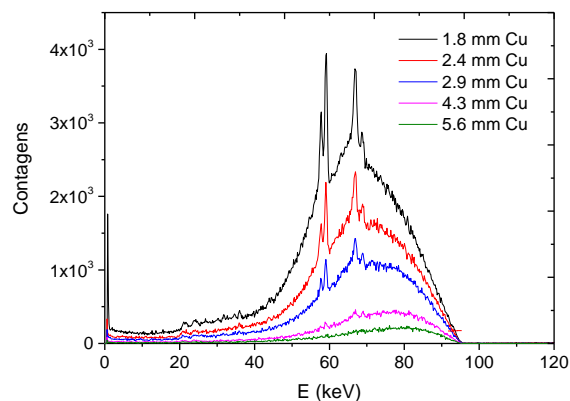


Figura 3: Espectros de raios X emitidos pelo tubo Yxlon Smart 300 HP, medidos durante 40 s com um espectrômetro Amptek XR100T- CdTe, para tensão nominal de 100 kV e corrente de 3,0 mA no tubo, com filtração adicional de 4,0 mmAl mais diferentes espessuras de cobre.

A Figura 4 apresenta os espectros de raios X medidos para diferentes correntes (conjunto **B**).

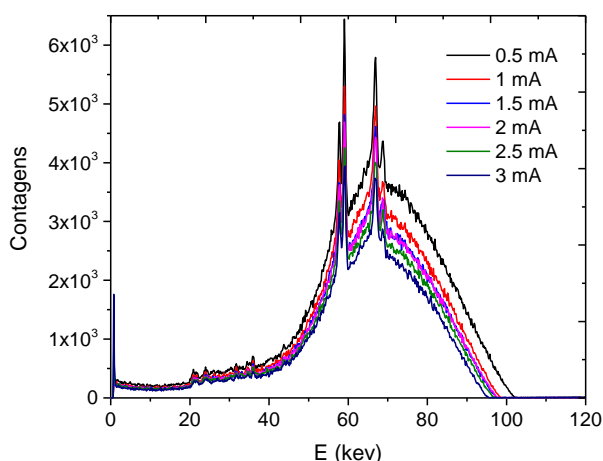


Figura 4: Espectros de raios X emitidos pelo tubo Yxlon Smart 300 HP, medidos um espectrômetro Amptek XR100T-CdTe, para tensão nominal de 100 kVp e 120 mAs no tubo, com filtração adicional de 4,0 mmAl + 1,8 mmCu.

Os valores de kVp determinados para o conjunto **A**, apresentaram boa concordância entre si com variação máxima de 0,16 kV e desvio padrão de 0,05 (Tabela 1). Esse resultado foi obtido com espectros medidos com tempo morto variando de 0,2 até 10%, o que indica baixa influência desse parâmetro, até esse limite, nessa técnica de determinação da kVp. Por outro lado, os espectros do conjunto **B**, medidos com diferentes correntes, apresentaram variação no valor de kVp estimado de até 7 kV, e um desvio padrão de 2,3 kV (Tabela 2). Do mesmo modo que os espectros do conjunto **A**, os espectros do conjunto **B** foram avaliados para um tempo morto de até 10%.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores de kVp (kVp espectral) e os valores de camada semirredutora (CSR espectral) calculados por meio dos espectros experimentais, além dos respectivos valores de taxa de contagens e tempo morto.

Tabela 1. kVp e CSR determinados a partir dos espectros de raios X do conjunto A, medidos com diferentes filtrações de cobre, e seus respectivos valores de tempo morto e taxa de contagens.

CONJUNTO A				
Filtração de Cu (mm)	kVp espectral (kV)	CSR espectral (mmAl)	Taxa de Contagens	Tempo morto(%)
1,8	95,2	9,28 (2)	15681	10,12
2,4	95,1	9,74 (2)	9482	5,87
2,9	95,2	9,90 (2)	6009	3,80
4,3	95,2	10,26 (3)	2145	1,08
5,6	95,3	10,19 (6)	1023	0,23

Tabela 2. Valores de kVp e CSR determinados a partir dos espectros de raios X do conjunto B, medidos com diferentes valores de corrente (mA), e seus respectivos valores de taxa de contagens e tempo morto.

CONJUNTO B				
Corrente (mA)	kVp espectral (kV)	CSR espectral (mmAl)	Taxa de Contagens	Tempo morto(%)
0,5	102,3	9,78 (1)	3821	2,42
1,0	98,5	9,57 (1)	6471	4,20
1,5	97,4	9,53 (1)	8922	5,93
2,0	97,6	9,56 (1)	12076	8,07
2,5	97,0	9,42 (1)	14208	9,35
3,0	95,3	9,28 (2)	15681	10,12

3.2. Camada Semi-redutora

Os valores de CSR, obtidos a partir dos espectros corrigidos, constam também das Tabelas 1 (Conjunto A) e 2 (Conjunto B). As incertezas apresentadas são apenas do tipo A¹⁸. Os valores de camada semirredutora determinados através de alguns dos espectros medidos e corrigidos aparecem na Tabela 3, comparados àqueles determinados por medições com câmara de ionização.

Tabela 3. Comparação entre os valores de CSR obtidos com câmara de ionização (feixe largo) e através dos espectros medidos (feixe estreito) e corrigidos, para feixes do tubo Yxlon com 100 kVp nominais, e filtração de 4 mmAl + 1,8 mmCu.

Corrente (mA)	CSR espectral (mmAl)	CSR câmara (mmAl)
1,5	9,53(1)	10,7(2)
3,0	9,28(2)	10,8(2)

4. Discussão

Os espectros de raios X medidos com os mesmos parâmetros de exposição (tensão nominal e corrente) (conjunto **A**) apresentaram boa concordância entre si no valor de kVp estimado (95,21 ± 0,03 kV), indicando a necessidade de calibração da indicação do painel de controle para a técnica usada, uma vez que o valor de tensão nominal usado foi 100 kVp. Desse modo, pode-se afirmar que, nesse caso, o método utilizado fornece valores de kVp com boa exatidão e reprodutibilidade. Além disso, os resultados mostraram que variações de tempo morto entre 0,23% e 10,12%, e de taxas de contagens entre 1000 e 15000 não afetaram significativamente os valores determinados para a tensão aplicada ao tubo.

Os espectros de raios X medidos com diferentes valores de corrente (mA), carga fixa (mAs) e tensão nominal constante (conjunto **B**) mostraram, de outro lado, média de 98 ± 1 kV, e variação de até 7 kV no valor de tensão de pico. Isto sugere que o equipamento utilizado faz uma compensação da corrente reduzindo o valor da tensão e afetando o espectro do feixe. Desse modo, é importante avaliar a tensão aplicada a tubos de raios X para diferentes valores de corrente, e não somente para um único valor como se tem feito, em alguns casos, na prática de controle de qualidade de equipamentos de raios X de diagnóstico convencional, fluoroscopia e mamografia no Brasil¹⁷.

Apesar de não se ter utilizado um tubo clínico para este estudo, os resultados reforçam a necessidade de avaliação da tensão de pico para controle de qualidade de equipamentos clínicos, uma vez que variações no kVp podem causar variações significativas na dose recebida pelo paciente e na qualidade das imagens produzidas.

O aumento do valor de CSR estimado para os espectros corrigidos, à medida que cresce a filtração do Cu, era esperada, uma vez que esta filtração retira os fótons de baixas energias do feixe, tornando-o mais "duro". No entanto, a variação da CSR não deveria apresentar tendência para espectros medidos com mesma filtração (conjunto B). Os resultados mostraram, no entanto, uma ligeira redução do valor de CSR com o aumento da corrente. É evidente que esta variação ocorreu devido à variação da kVp neste conjunto de espectros.

Os valores de CSR estimados a partir dos espectros de raios X comparados com valores determinados por meio das medições com câmara de ionização realizadas apresentaram significativa diferença (7%). Isso se deve provavelmente à contribuição do espalhamento nas medições com a câmara de ionização, uma vez que foram utilizados feixes mais largos neste experimento, já que o feixe deveria cobrir todo o volume sensível da câmara (30 cm^3)¹³.

5. Conclusões

Os resultados mostraram que as modificações no espectro devido à variação no tempo morto (0,23% - 10,12%) e taxa de contagens (1×10^3 - $1,5 \times 10^4$) não afetam significativamente o valor determinado da tensão aplicada ao tubo, para corrente constante, na metodologia espectral. Os valores de kVp estimados através da técnica de *end point* do espectro podem ser utilizados com boa precisão na calibração do valor nominal de tensão do tubo, assim como dos medidores não-invasivos de kVp¹⁸. Os valores de tensão aplicada ao tubo podem variar para diferentes valores de correntes usadas em equipamentos clínicos ou não.

Os espectros de raios X podem ser usados para estimar valores de kVp com boa exatidão e reprodutibilidade.

Os valores de CSR determinados a partir dos espectros de raios X podem ser tomados como

referência para comparação com resultados obtidos por outros métodos, como por exemplo, usando câmaras de ionização. A comparação é mais próxima quando as condições de medição (feixe estreito ou largo) são semelhantes, o que mostra a sensibilidade da metodologia de determinação espectral da CSR.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte parcial do INCT de Metrologia das Radiações na Medicina (CNPq e FAPESP) e da FAPESP através do projeto 2013/07117-0.

Referências

1. Johns HE, Cunningham JR. The Physics of Radiology. fourth edition ed. USA: Springfield U.S.A., : Thomas Book; 1983.
2. Miyajima S, Imagawa K, Matsumoto M. CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy. Medical Physics. 2002;29(7):1421-9.
3. Miyajima S. Thin CdTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy. Medical Physics. 2003;30(5):771-7.
4. Miyajima S, Imagawa K, Matsumoto M. An alignment method for mammographic X-ray spectroscopy under clinical conditions. Brit J Radiol. 2002;75(897):763-6.
5. Stumbo S, Bottigli U, Golosio B, Oliva P, Tangaro S. Direct analysis of molybdenum target generated x-ray spectra with a portable device. Med Phys. 2004;31(10):2763-70.
6. Santos JC, Tomal A, Mariano L, Costa PR. Application of a semi-empirical model for the evaluation of transmission properties of barite mortar. Applied Radiation and Isotopes. 2015.
7. Santos JC, Mariano L, Tomal A, Costa PR. Evaluation of conversion coefficients relating air-kerma to $H^*(10)$ using primary and transmitted x-ray spectra in the diagnostic radiology energy range. Journal of Radiological Protection. 2016;36(1):117-32.
8. Lopez Gonzales AH, Santos JC, Mariano L, Tomal A, Costa PR. Evaluation of mean conversion coefficients from air-kerma to $H^*(10)$ using secondary and transmitted x-ray spectra in the diagnostic radiology energy range. Journal of Radiological Protection. 2016;36(4):842-57.
9. Martin CJ, Sutton DG, Sharp PF. Balancing patient dose and image quality. Applied Radiation and Isotopes. 1999;50(1):1-19.
10. Giarratano JC. Comparison of voltage-divider, modified Ardran-Crooks cassette, and Ge(Li) spectrometer methods to determine the peak kilovoltage (kVp) of diagnostic x-ray units. Med Phys. 1976;3(3):142-7.
11. Silva MC, Herdade SB, Lammoglia P, Costa PR, Terini RA. Determination of the voltage applied to x-ray tubes from the bremsstrahlung spectrum obtained with a silicon PIN photodiode. Med Phys. 2000;27(11):2617-23.
12. Terini RA, Pereira MA, Kunzel R, Costa PR, Herdade SB. Comprehensive analysis of the spectrometric determination of voltage applied to X-ray tubes in the radiography and mammography energy ranges using a silicon PIN photodiode. The British journal of radiology. 2004;77(917):395-404.
13. IEC. Medical Diagnostic X-ray Equipment - Radiation Conditions for Use in the Determination of Characteristics. Geneva; 2005. Report No.: IEC-61267.
14. Di Castro E, Pani R, Pellegrini R, Bacci C. The use of cadmium telluride detectors for the qualitative analysis of diagnostic x-ray spectra. Phys Med Biol. 1984;29(9):1117-31.
15. Tomal A, Santos JC, Costa PR, Lopez Gonzales AH, Poletti ME. Monte Carlo simulation of the response functions of CdTe detectors to be applied in x-ray spectroscopy. Applied Radiation and Isotopes. 2014.
16. NIST. [online]. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest <<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>> [viewed on december 2015] [

17. Brasil. Radiodiagnóstico Médico: Desempenho de Equipamentos e Segurança. Brasília: Editora Anvisa; 2005. 104 p. p.
18. TÉCNICAS ABDN. Guia Para Expressão da Incerteza de Medição. Rio de Janeiro: INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL, INMETRO; 2003.
19. Pereira MAG, Severo LS, A. TR. Calibração de medidores multifuncionais dotados de detectores semicondutores. Anais do XV Congresso Brasileiro de Física Médica, 18-21/08/2010.; Aracajú2010.

Contato:

Josilene Cerqueira Santos
Laboratório de Dosimetria e Física Médica
Instituto de Física da USP
Rua do Matão, 1371, CEP 05508-090
Cidade Universitária, São Paulo - Brasil
E-mail: josilene@usp.br