

Reconstrução espectral de feixes de raios X padrões nível radioproteção com base nas curvas de transmissão

Gustavo S. P. Pamplona¹, Alessandro M. Costa¹ e Linda V. E. Caldas²

¹Departamento de Física e Matemática
Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto
Universidade de São Paulo
Avenida Bandeirantes, 3900
14040-901 Ribeirão Preto, SP, Brasil

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
Avenida Professor Lineu Prestes, 2242
05508-000 São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

O espectro de um feixe de raios X pode ser derivado por um método indireto com base na medição da curva de transmissão do feixe de raios X e com a utilização de um par de transformadas de Laplace. O objetivo deste trabalho foi a aplicação deste método para obter o espectro de raios X em campos padrões de energias intermediárias nível radioproteção. Os espectros derivados apresentaram uma boa concordância com dados experimentais, mostrando o valor da análise da curva de transmissão em comparação com métodos espectroscópicos uma vez que os dados de transmissão podem ser obtidos com comparativa facilidade.

INTRODUÇÃO

Dosímetros são usados em radioproteção tanto para a monitoração de área quanto para a monitoração pessoal. Os dosímetros usados para medir os níveis de radiação são referidos como monitores de área e os dosímetros usados para registrar a dose em indivíduos que trabalham com radiação são chamados de dosímetros pessoais. Todos os dosímetros devem ser calibrados em termos de grandezas adequadas nas qualidades de radiação de referência.

As qualidades de radiação X e gama de referência utilizadas para calibrar dosímetros utilizados na dosimetria em radioproteção são definidas pela International Organization for Standardization (ISO). Na norma internacional ISO 4037-1 [1] a qualidade de uma radiação X filtrada é especificada em termos da energia média dos fótons, da primeira camada semi-redutora e do coeficiente de homogeneidade. O coeficiente de homogeneidade é a relação entre a primeira camada semi-redutora e a segunda camada semi-redutora.

A primeira e a segunda camada semi-redutora podem ser determinadas a partir de medições de transmissão utilizando câmaras de ionização. A energia média dos fótons só pode ser determinada a partir dos espectros das qualidades de radiação X.

A medida direta do espectro de um feixe de raios X por algum método espectroscópico é relativamente difícil e cara. Espectros podem ser alternativamente, determinados por um método indireto a partir de medições da curva de transmissão do feixe de raios X e do uso de transformadas de Laplace [2,3].

O objetivo deste trabalho foi a aplicação de um método indireto que usa um modelo espectral baseado em um par de transformadas de Laplace para obter o espectro de raios X em um campo padrão de energia intermediária nível radioproteção a partir da curva de transmissão medida experimentalmente. Com base no espectro obtido foi determinada a energia média dos fótons e o coeficiente de conversão de kerma no ar para equivalente de dose pessoal para um objeto simulador de tronco humano e ângulo de incidência de 0° [4,5].

MATERIAIS E MÉTODOS

O kerma no ar K para um feixe de raios X é normalmente expresso pela equação

$$K = \int_0^{\infty} \Phi_E E \frac{\mu_{tr}}{\rho}(E) dE, \quad (1)$$

em que Φ_E é a distribuição em energia de fluência e μ_{tr}/ρ é o coeficiente de transferência de energia em massa do ar para fótons de energia E .

Se um feixe estreito é atenuado com um material de espessura em massa d , a distribuição em energia de fluência se torna

$$\Phi_E(d) = \Phi_E(0) e^{-\mu_m d}, \quad (2)$$

em que μ_m é o coeficiente de atenuação em massa do material atenuador.

O kerma no ar se torna uma função de d e é dado pela equação

$$K(d) = \int_0^{\infty} \Phi_E(0) E \frac{\mu_{tr}(E)}{\rho} e^{-\mu_m d} dE. \quad (3)$$

A transmissão relativa $T(d)$ é definida como a razão entre o kerma no ar total do feixe atenuado, $K(d)$, e o kerma no ar total do feixe não atenuado, $K(0)$:

$$T(d) = \frac{K(d)}{K(0)}. \quad (4)$$

Seja

$$F(E) = \frac{\Phi_E(0) E \frac{\mu_{tr}(E)}{\rho}}{K(0)}. \quad (5)$$

Então, a partir das equações (3), (4) e (5),

$$T(d) = \int_0^{\infty} F(E) e^{-\mu_m d} dE. \quad (6)$$

$F(E)dE$ é a fração de $K(0)$ que é devida aos fótons de energia entre E e $E+dE$.

Mudando a variável de integração de E para μ_m e colocando

$$F(E) \left(-\frac{dE}{d\mu_m} \right) = f(\mu_m), \quad (7)$$

a equação (6) se torna

$$T(d) = \int_0^{\infty} f(\mu_m) e^{-\mu_m d} d\mu_m. \quad (8)$$

Nesta mudança de variável é assumido que μ_m é uma função diferenciável e monotonicamente decrescente de E ; $\mu_m \rightarrow 0$ quando $E \rightarrow \infty$ e $\mu_m \rightarrow \infty$ quando $E \rightarrow 0$.

A definição de uma transformada de Laplace é [6]:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt. \quad (9)$$

Então, a curva de transmissão de um feixe de raios X pode ser descrita como uma transformada de Laplace:

$$T(d) = \mathcal{L}[f(\mu_m)]. \quad (10)$$

Se a curva de transmissão é conhecida, $f(\mu_m)$ é determinada pela transformada de Laplace inversa,

$$f(\mu_m) = \mathcal{L}^{-1}[T(d)], \quad (11)$$

e o espectro $F(E)$ derivado dela como

$$F(E) = f(\mu_m) \left(-\frac{d\mu_m}{dE} \right). \quad (12)$$

Neste trabalho, é assumido que a curva de transmissão é representada pelo modelo matemático proposto por Greening [2]:

$$T(d) = \sqrt{\frac{a}{d+a}} e^{-b(\sqrt{d+a}-\sqrt{a})} e^{-\mu_m^0 d}, \quad (13)$$

em que a e b são parâmetros a serem ajustados e μ_m^0 é o coeficiente de atenuação em massa do material atenuador para a energia máxima do espectro.

A transformada de Laplace inversa correspondente à equação (13) é

$$f(a, b, \mu_m) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \frac{e^{-b\sqrt{a} - (\mu_m - \mu_m^0)a - \frac{b^2}{4(\mu_m - \mu_m^0)}}}{\sqrt[3]{(\mu_m - \mu_m^0)}}. \quad (14)$$

Os parâmetros a e b para a curva de transmissão foram obtidos a partir de um ajuste não linear a estes dados utilizando a equação (13).

Os parâmetros de ajuste a e b foram aplicados ao modelo matemático dado pela equação (14) para determinar o espectro de kerma no ar aproximado:

$$F(E) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \frac{e^{b\sqrt{a} - (\mu_m - \mu_m^0)a - \frac{b^2}{4(\mu_m - \mu_m^0)}}}{\sqrt[3]{(\mu_m - \mu_m^0)}} \left(-\frac{d\mu_m}{dE} \right). \quad (15)$$

O material atenuador utilizado neste trabalho foi o cobre. Os coeficientes de atenuação em massa do cobre foram computados interpolando-se entre dois pontos em uma escala log-log dentro dos valores dados por Hubbel e Seltzer [7]. Os valores de $d\mu_m/dE$ foram calculados a partir da diferenciação das equações de interpolação utilizadas.

Foi utilizado um equipamento de raios X industrial Seifert/Pantak, modelo ISOVOLT 160HS, que opera entre 5 kV e 160 kV, com potencial constante, e de 0,1 mA a 45 mA. Neste equipamento estão implantados os feixes de raios X padrões nível radioproteção N-60, N-80, N-100 e N-150, de acordo com norma internacional ISO 4037-1 [1].

As curvas de transmissão para a qualidade da radiação N-60 foram medidas para as distâncias de 1 m e 2,5 m do foco do tubo de raios X utilizando-se placas de cobre puro (pureza maior que 99,9%) e duas câmaras de ionização, sendo uma para a distância de 1 m e outra para a distância de 2,5 m. Para a distância de 1 m foi utilizada a câmara de ionização PTW-Freiburg modelo 31003 e para a distância de 2,5 m foi utilizada a câmara de ionização PTW-Freiburg modelo 32002.

Os espectros de kerma no ar obtidos foram utilizados para obter os espectros de fluência a partir da equação (5) e, em seguida, calcular a energia média dos fótons definida por [1,4,5]:

$$\bar{E} = \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \Phi_E E dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \Phi_E dE}, \quad (16)$$

em que E_{min} , é a energia mínima dos espectros e E_{max} é a energia máxima.

Os coeficientes de transferência de energia em massa para o ar na equação (5) foram computados interpolando-se entre dois pontos em uma escala log-log dentro dos valores de coeficiente de absorção de energia em massa para o ar dados por Hubbel Seltzer [7], uma vez que as diferenças são insignificantes para as energias dos fótons considerado neste trabalho.

Também com base nos espectros de kerma no ar obtidos a partir das curvas de transmissão foi determinado o coeficiente de conversão de kerma no ar para equivalente de dose pessoal para um objeto simulador de tronco humano e ângulo de incidência de 0° , dada por [4,5]:

$$h_{pK}(10; N-60, 0^\circ) = \frac{\int_{E_{min}}^{E_{max}} F(E) h_{pK}(10; E, 0^\circ) dE}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} F(E) dE}. \quad (17)$$

Os coeficientes de conversão monoenergéticos $h_{pK}(10; E, 0^\circ)$ foram computados interpolando-se entre quatro pontos em uma escala linear dentro dos valores dados pela *International Commission on Radiological Protection* [8].

RESULTADOS

As Figuras 1 e 2 mostram as curvas de transmissão medidas para o cobre para as distâncias de 1 m e 2,5 m respectivamente. Os círculos representam os pontos experimentais e as linhas são os resultados de ajustes não lineares aos pontos experimentais utilizando a equação (13).

As Figuras 3 e 4 mostram os espectros de raios X do equipamento utilizado neste trabalho determinados a partir das curvas de atenuação (círculos). Nas mesmas figuras são mostrados os espectros medidos diretamente em um outro equipamento de raios X por Ankerhold [5] utilizando um detector de germânio (triângulos). Estes espectros também correspondem à qualidade de radiação N-60 definida pela ISO e foram colocados nas Figuras 3 e 4 para comparação.

A energia média dos fótons calculada com base no espectro obtido a partir da curva de transmissão medida para a distância de 1 m foi 48,4 keV.

O coeficiente de conversão de kerma no ar para equivalente de dose pessoal para um objeto simulador de tronco humano e ângulo de incidência de 0° calculado com base no espectro obtido a partir da curva de transmissão medida para a distância de 1 m foi 1,67. Para a distância de 2,5 m foi 1,66.

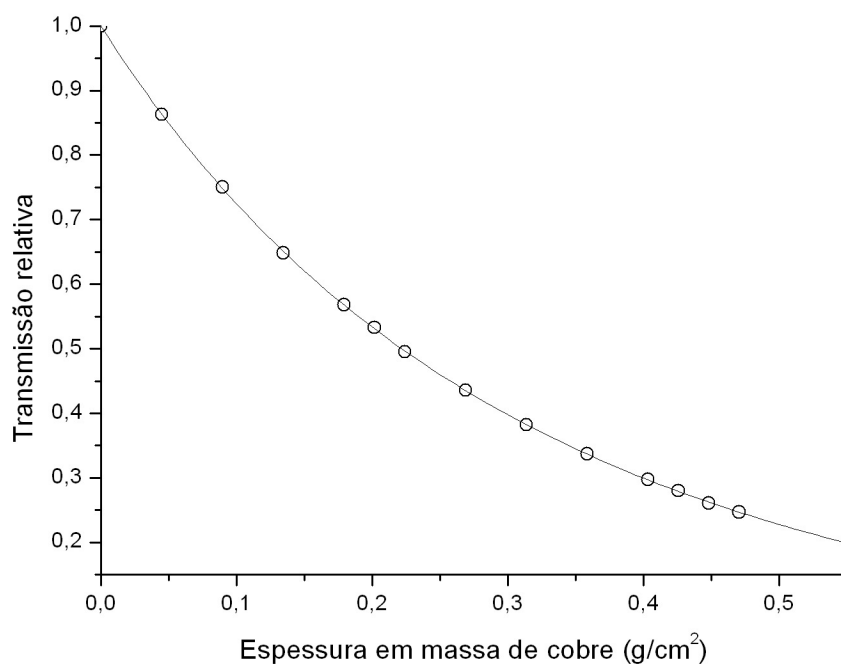


Figura 1. Curva de transmissão medida para o cobre para a distância de 1 m.

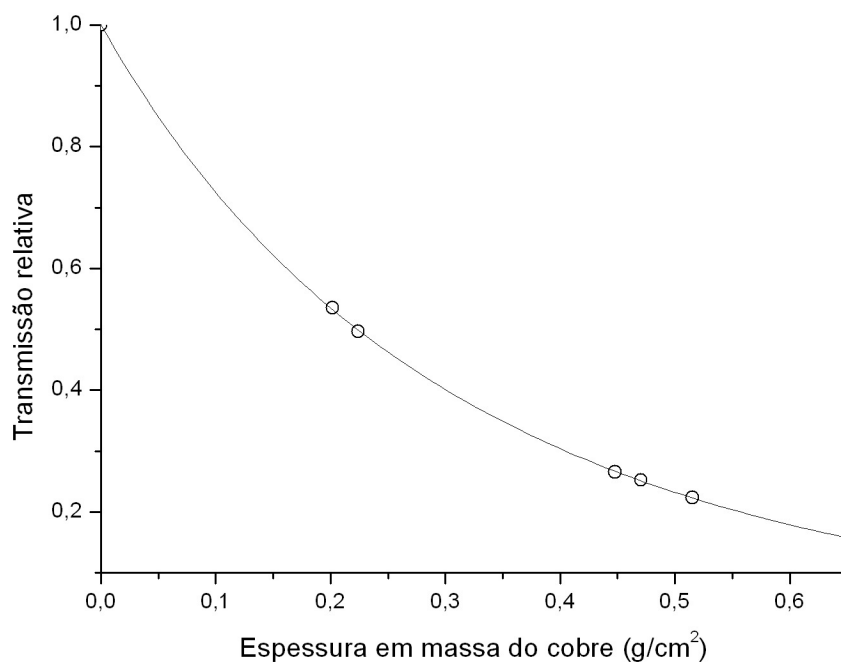


Figura 2. Curva de transmissão medida para o cobre para a distância de 2,5 m.

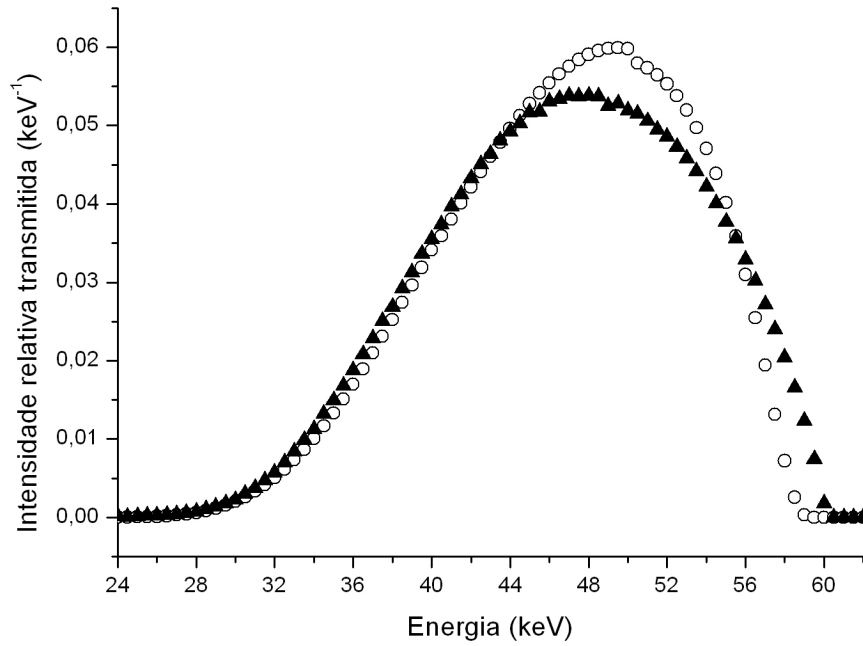


Figura 3. Espectro de raios X determinado a partir da curva de transmissão medida para o equipamento de raios X utilizado neste trabalho(O) para a distância de 1 m e espectro de raios X medido diretamente em um outro equipamento para a qualidade de radiação N-60 e distância de 1 m (▲).

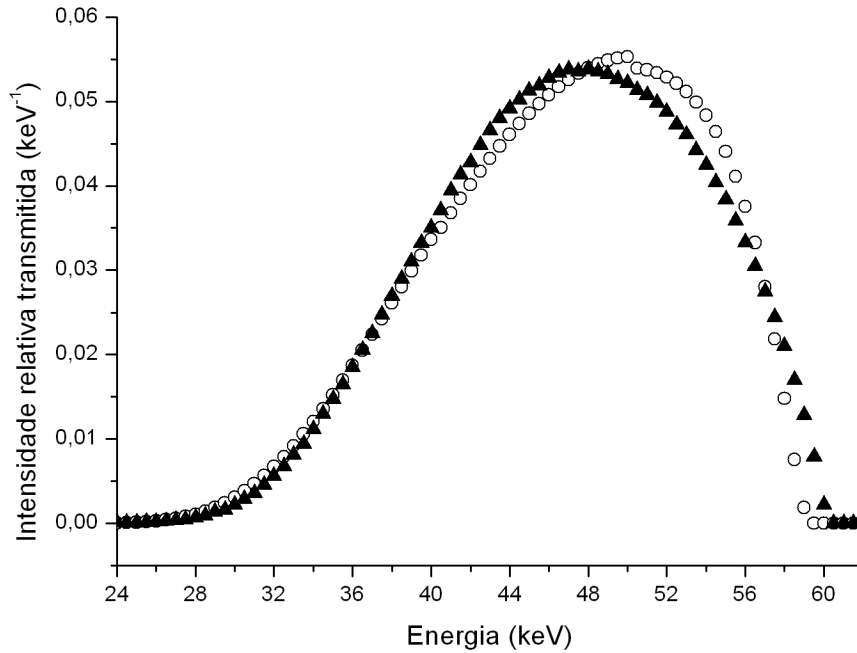


Figura 3. Espectro de raios X determinado a partir da curva de transmissão medida para o equipamento de raios X utilizado neste trabalho(O) para a distância de 2,5 m e espectro de raios X medido diretamente em um outro equipamento para a qualidade de radiação N-60 e distância de 2,5 m (▲).

DISCUSSÃO

Como pode ser visto nas Figuras 1 e 2, a equação (13) representa com boa qualidade as curvas de transmissão medidas. O maior desvio entre a transmissão relativa medida e calculada é de aproximadamente 0,5%.

A comparação entre os dois espectros na Figura 3 e 4 sugere que os espectros determinados a partir das curvas de transmissão são uma boa aproximação principalmente com relação às suas formas.

A energia média dos fótons de 48,4 keV calculada para a distância de 1 m apresentou uma boa concordância com o valor dado na norma internacional ISO 4037-1 [1] que é de 48 keV.

O valor do coeficiente de conversão de kerma no ar para equivalente de dose pessoal para um objeto simulador de tronco humano e ângulo de incidência de 0° é dado na norma internacional ISO 4037-3 [9] para uma distância de 2 m. Interpolando-se os valores calculados neste trabalho nas distâncias de 1 m e 2,5 m para a distância de 2 m, obtemos o valor 1,67, que apresenta uma boa concordância com o valor dado na norma internacional ISO 4037-3 [9] que é de 1,65.

CONCLUSÕES

Um modelo espectral baseado em um par de transformadas de Laplace para a obtenção do espectro de raios X a partir de dados de transmissão foi aplicado usando curvas de transmissão medidas experimentalmente. Os espectros obtidos proporcionam uma boa aproximação quando comparados com espectros medidos diretamente. A energia média dos fótons de raios X e o coeficiente de conversão de kerma no ar para equivalente de dose pessoal calculados a partir dos espectros obtidos neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios, como era de se esperar, uma vez que a integração é um processo de regularização para a distribuição espectral. Assim, os espectros aproximados obtidos neste trabalho podem ser utilizados para calcular grandezas dosimétricas ou radiométricas de maneira satisfatória. A análise da curva de transmissão em comparação com os métodos espectroscópicos é uma boa alternativa uma vez que a curva de transmissão pode ser obtida com comparativa facilidade. Deve-se ressaltar que o modelo utilizado neste trabalho só abrange o espectro de bremsstrahlung, deixando de fora os raios X característicos. Há um plano de continuação na mesma linha deste trabalho para incluir as qualidades de radiação nas quais os espectros devem apresentar raios X característicos.

REFERÊNCIAS

- [1] International Organization for Standardization, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods, ISO, Geneva, Switzerland, 1996.
- [2] Greening JR. The determination of x-ray wavelength distributions from absorption data. *P Phys Soc Lond A* 1950; 63(371):1227-34.
- [3] Archer BR, Wagner LK. A Laplace transform pair model for spectral reconstruction. *Med Phys* 1982, 9(6):844-47.
- [4] Ankerhold U, Behrens R, Ambrosi P. X-ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma, K_a , to personal dose equivalent, $H_p(10)$, for radiation qualities of the ISO narrow spectrum series. *Rad Prot Dosim* 1999, 81(4):247-58
- [5] Ankerhold U. Catalogue of x-ray spectra and their characteristic data – ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered x-ray spectra. – PTB-Report Dos-34, 2006.
- [6] McCollum PA, Brown BF, Laplace transform tables and theorems. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1965.
- [7] Hubbell JH, Seltzer SM. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients (version 1.4). [Online] Available: <http://physics.nist.gov/xaamdi> [2009, November 17]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
- [8] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 74, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *Ann ICRP* 1996, 26(3-4).
- [9] International Organization for Standardization, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence, ISO, Geneva, Switzerland, 1999.