

Estudo da resposta de um dosímetro eletrônico individual

Diana D. Duarte¹, João Cardoso², Luís Santos², Carlos Oliveira², Lina Vieira¹

1. Área Científica de Medicina Nuclear, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, dianadduarte@gmail.com

2. Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes, Instituto Tecnológico e Nuclear

RESUMO: Introdução – A monitorização da exposição ocupacional a doses de radiação ionizante pode ser complementada por dosímetros eletrónicos individuais que permitem uma leitura direta da dose de radiação recebida. Dada a dependência energética e de débito de dose já reportada para estes dosímetros, este trabalho pretende determinar a linearidade da resposta de um dosímetro eletrônico individual e estudar o comportamento da sua resposta em função da energia de radiação e do débito de dose. **Metodologia** – Para estudar a dependência da energia da radiação do dosímetro eletrônico pessoal *Vertec Bleeper Sv* procedeu-se à sua irradiação com um equivalente de dose individual, $H_p(10)$, de 500 μSv de radiação gama do Cobalto – 60 (^{60}Co) e Césio – 137 (^{137}Cs) e das qualidades de radiação X da série *Narrow* (N): N-30, N-40, N-60, N-80, N-100 e N-120. Para investigar a dependência da resposta em função do débito de dose aplicaram-se à ampola de raios X as intensidades de corrente elétrica de 1 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA e 20 mA. **Resultados** – Não existe uma relação entre a resposta do detetor e a energia de radiação a que este é exposto. Ocorre uma subestimação superior a 50% na grandeza medida para energias inferiores a 33 keV, mas ostenta uma medida relativamente linear da grandeza $H_p(10)$ para doses inferiores a 100 μSv . Também se constata que, à medida que o débito de dose aumenta, existe uma diminuição na resposta do dosímetro. O menor decréscimo na resposta deste dosímetro eletrônico individual dá-se para as qualidades de radiação N-30 (1,1%), N-40 (4,1%) e N-120 (20,0%). **Conclusão** – Verifica-se que a resposta do dosímetro individual *Vertec Bleeper Sv* depende fortemente da energia da radiação e do débito de dose.

Palavras-chave: débito de dose, equivalente de dose individual, dosímetro electrónico pessoal, energia de radiação.

Dose rate and energy dependency of an electronic personal dosimeter

ABSTRACT: Introduction – The measurement of occupational exposure to radiation doses can be completed with an electronic personal dosimeter that allows a direct reading and alarm function of the received radiation dose. Due to the energy and dose rate dependence already reported for this type of dosimeter, it is intended, with this work, to determine the response linearity of an Electronic Personal Dosimeter and to study its response behavior to the dose rate and radiation energy. **Methodology** – The electronic personal dosimeter *Vertec Bleeper Sv* energy dependency was evaluated by its irradiation with 500 μSv from the radionuclides Cobalt – 60 (^{60}Co) and Cesium – 137 (^{137}Cs) as well as by the radiation qualities of the *Narrow* (N) series: N-30, N-40, N-60, N-80, N-100 e N-120. To investigate the dose rate dependency, the intensities of electric current of 1 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA and 20 mA were applied to the X-ray tube. **Results** – There is no relationship between the response of the detector and the radiation energy. For energies below 33 keV there is an underestimation over 50% of the radiation dose measured but the detector presents a linear response for energies under 100 μSv . A dependency on the dose rate is perceived since as the dose rate increases, the response of the individual monitor decreases. There is a smaller decrease for the radiation qualities of N-30 (1.1%), N-40 (4.1%) and N-120 (20.0%). **Conclusion** – It is concluded that there is a strong dependence of radiation energy and dose rate on the response of an electronic personal dosimeter.

Keywords: dose rate, electronic personal dosimeter, personal dose equivalent, radiation energy

Introdução

Os indivíduos que estão ocupacionalmente expostos à radiação ionizante devem estar sujeitos a uma monitorização individual. A avaliação da exposição à radiação ionizante em corpo inteiro é realizada pela medição do equivalente de dose individual, $H_p(10)$, grandeza que permite uma estimativa da dose efetiva para radiações penetrantes provenientes de uma fonte externa¹⁻⁴. Esta medição é tipicamente realizada através de dosímetros passivos, como os dosímetros termo-luminescentes (TLD do acrónimo inglês *Thermoluminescent Dosimeter*) de leitura periódica⁵; no entanto, estes não são os únicos a serem utilizados com esta finalidade. Os dosímetros eletrónicos individuais permitem uma leitura direta da dose recebida e emitem um sinal sonoro de alarme, possibilitando, assim, uma avaliação das condições de segurança no ambiente de trabalho no imediato^{1,6}.

Os dosímetros eletrónicos individuais podem ser constituídos por detetores *Geiger-Müller* miniatura ou por detetores de silicóne. Os dosímetros constituídos por *Geiger-Müller* demonstram uma resposta não linear perante diferentes energias⁷⁻⁸, dada a ineficácia destes para incluir a energia de cada fóton no seu sistema de contagem⁸. Além do mais, é reportada uma elevada subestimação da grandeza medida para elevados débitos de dose⁹.

Deste modo, numa prática diária com radiações ionizantes é fundamental compreender como o equipamento responde às várias energias e débitos de dose a que os indivíduos estão sujeitos numa exposição ocupacional, de modo a proceder a uma avaliação correta das doses de radiação que o indivíduo foi exposto^{5,10}. Este estudo tem como finalidade determinar a linearidade da resposta de um dosímetro eletrónico individual, da influência da energia e do débito de dose na resposta deste monitor individual de proteção radiológica.

Metodologia

Foi utilizado um monitor individual de proteção radiológica de alarme e leitura direta da marca *Vertec Bleeper Sv*⁶. Este dosímetro é constituído por um detetor gasoso *Geiger-Müller*, que possui um intervalo de energia de 45 keV a 6 MeV⁶ e apresenta a medida de $H_p(10)$ numa escala de 1 a 999999 μ Sv. Para o posicionamento do monitor individual foram utilizados um fantoma de água padronizado pela *International Standard Organization* (ISO) e placas de equilíbrio eletrónico de polimetilmetacrilato (PMMA) de 2mm e 4mm¹¹, de modo a garantir que as condições exigidas pela norma internacional ISO 4037-3¹¹ estivessem garantidas. Como sistema de irradiação gama utilizou-se o sistema de irradiação colimada *Shepherd model 81 Calibrator*. Este possui três fontes radioativas de ¹³⁷Cs, com uma energia média da radiação gama de 661,7 keV¹²⁻¹³ com atividades reportadas à data da experiência de 52275 MBq, 523 GBq e de 4752 GBq. Possui também uma fonte de ⁶⁰Co, cuja energia média da radiação gama emitida é de 1252,5 keV¹²⁻¹³ com uma atividade reportada à data da experiência de 12,74 GBq. Como sistema de irradiação X

utilizou-se a ampola de raios X da marca Philips, modelo *MCN 165*, tendo sido estudadas as qualidades de radiação N-30, N-40, N-60, N-80, N-100 e N-120. Os filtros inerentes e adicionais utilizados para cada qualidade de radiação X encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos filtros inerentes e adicionais do sistema de irradiação X

Qualidade de Radiação	Emed (keV)	Filtro inerente (mm Al)	Filtros adicionais (mm)
N-30	24	-	4 Al
N-40	33	4	0,21 Cu
N-60	48	4	0,6 Cu
N-80	65	4	2 Cu
N-100	83	4	5 Cu
N-120	100	4	5 Cu + 1 Sn

O dosímetro eletrónico pessoal *Vertec Bleeper Sv* foi posicionado no centro da face frontal do fantoma de água ISO, de modo a que o seu ponto efetivo de medida coincidissem com o eixo do feixe de radiação produzido pela fonte radioativa. Ao utilizar o sistema de irradiação gama, o ponto efetivo de medida deve ser colocado entre 1,5m e 4m de distância da fonte radioativa, de acordo com a norma ISO 4037-3¹¹, sendo colocada na face frontal do monitor uma placa de PMMA com a espessura de 2mm para o ¹³⁷Cs e de 4mm para o ⁶⁰Co¹¹. Ao utilizar o sistema de irradiação X, o ponto efetivo de medida deve ser colocado entre 1m e 3m de distância da fonte radioativa, de acordo com a norma ISO 4037-3¹¹.

Verificação Metrológica

A verificação metrológica de um monitor individual de proteção radiológica consiste na determinação da linearidade da sua resposta¹¹. Esta determinação é realizada para cada uma das escalas do monitor em três valores da escala, nomeadamente a 20%, 40% e 80% do valor máximo de cada uma das escalas. Na verificação metrológica do dosímetro *Vertec Bleeper Sv* foram utilizadas as escalas de 1 a 10 μ Sv, 10 a 100 μ Sv, 100 a 1000 μ Sv e 1 a 10 mSv. Foi necessário calcular o valor convencional verdadeiro (V.C.V.), sendo este o valor obtido através da dosimetria com um padrão secundário de energia cinética libertada no ar (*kerma*, do acrónimo inglês *kinetic energy released per unit mass of air*) e convertido para equivalente de dose individual. Para cada escala foram efetuadas 20 medições de fundo. Para cada um dos pontos de teste foram realizadas 20 medições.

Para a verificação metrológica do dosímetro eletrónico pessoal foram utilizadas todas as qualidades de radiação X bem como a fonte de ⁶⁰Co e a fonte de ¹³⁷Cs de atividade 4752 GBq à data da experiência.

A resposta relativa (R.R.) do monitor individual de proteção radiológica, dada pela norma ISO 4037-3¹¹, é expressa por:

$$R.R. = \left(\frac{n - n_b}{V.C.V.} \times 100 \right) - 100 \quad (1.1.)$$

Em que n representa a medida (incluindo as contagens de fundo) e n_b representa as contagens de fundo. A cada R.R. é associada uma incerteza de medida, calculada de acordo com a lei de propagação de incertezas descrita no «Guia para a Incerteza de Medida» (GUM do acrónimo inglês *Guide to uncertainty of measurement*)¹⁴ onde foi utilizada uma abordagem do tipo A para a incerteza relativa às medições realizadas e uma abordagem do tipo B, com uma distribuição rectangular, para a distância da fonte radioativa ao monitor individual de proteção radiológica.

Estudo da resposta do monitor individual em função da energia

Para este estudo foram utilizadas as qualidades de radiação do sistema de radiação X para 30 kV, 40 kV, 60 kV, 80 kV, 100 kV e 120 kV e as fontes radioativas de ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co cujas energias médias são, respetivamente, de 24 keV, 33 keV, 48 keV, 65 keV, 83 keV, 100 keV, 662 keV e 1252,5 keV. O detetor individual de proteção radiológica foi irradiado com um $H_p(10)$ de 500 μ Sv.

De modo a calcular a dose de radiação a irradiar foi necessário utilizar os coeficientes de conversão descritos na norma ISO 4037-3¹¹ de *kerma* no ar que convertem a dose de radiação para equivalente de dose individual.

Para cada qualidade de radiação foram efetuadas 5 medições às quais foi subtraído o fundo radioativo.

A resposta do monitor individual é dada pelo quociente entre as medidas registadas e o V.C.V. associado a cada qualidade de radiação. A incerteza de medida foi calculada

de acordo com a lei de propagação de incertezas descrita no GUM¹⁴, onde foram utilizadas as mesmas abordagens de incerteza de medida que as descritas na metodologia para a verificação metrológica.

Estudo da resposta do monitor individual em função do débito de dose

Para o estudo da resposta do dosímetro eletrónico individual, em função do débito de dose, utilizaram-se apenas as qualidades de radiação X. Como os débitos de dose são proporcionais às intensidades de corrente fornecidas à ampola de raios X, foram aplicadas as intensidades de corrente elétrica de 1 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA e 20 mA, de modo a produzir diferentes débitos de dose. Foram realizadas 5 medições para cada uma das intensidades de corrente elétrica em cada qualidade de radiação, sendo a duração de cada medição de 1 minuto.

A resposta do monitor individual é dada pelo quociente entre as medidas registadas e o V.C.V. associado a cada qualidade de radiação.

Resultados

Verificação Metrológica

Os resultados da verificação metrológica efetuada ao monitor individual de proteção radiológica *Vertec Bleeper Sv*, obtidos pela determinação da linearidade da sua resposta, são ilustrados na Figura 1.

A incerteza de medição associada às medidas efetuadas varia entre 3,76% e 6,91% e encontra-se representada na figura pelas barras de erro sob a forma de valor absoluto (%).

Estudo da resposta do monitor individual em função da energia

A resposta do dosímetro individual, em função da energia da radiação, pode ser vista na Figura 2.

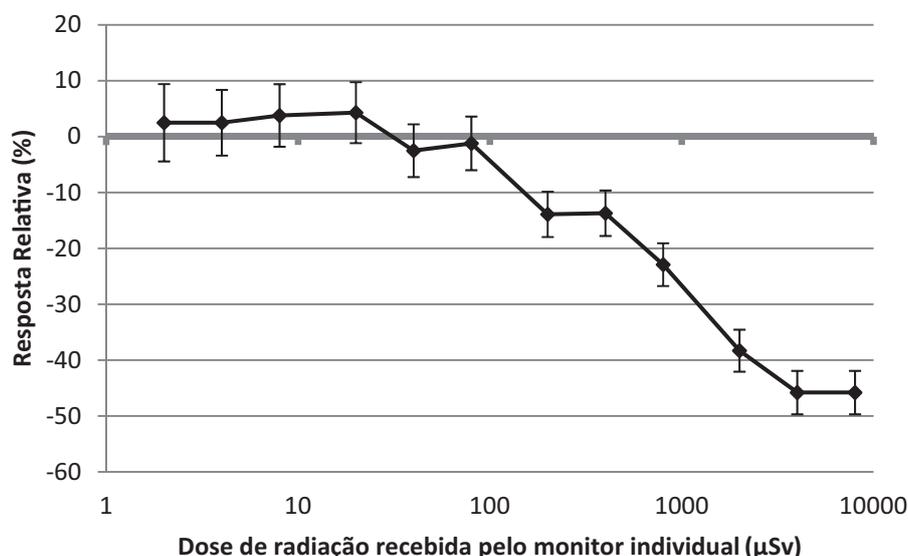


Figura 1: Linearidade da resposta de um monitor individual de proteção radiológica obtida através da sua verificação metrológica.

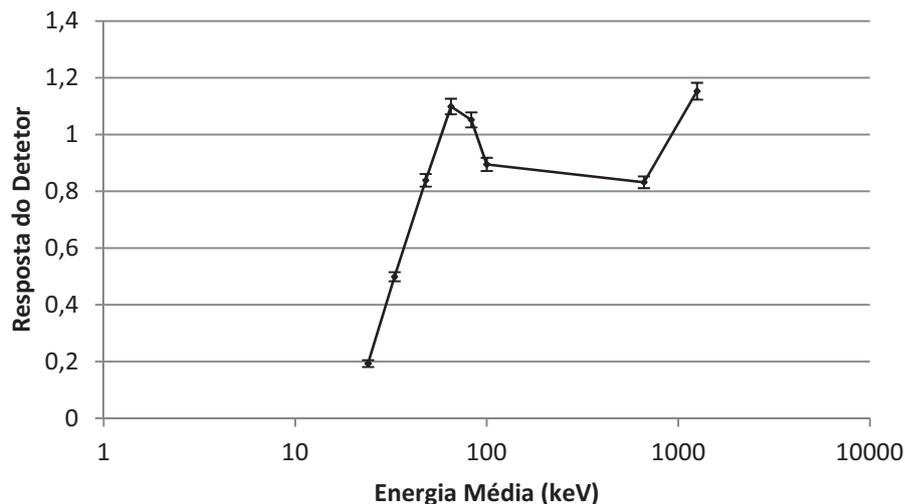


Figura 2: Resposta do detetor do monitor individual para energias no intervalo de 24 a 1252,5 keV.

A incerteza de medida é representada na figura pelas barras de erro sob a forma de valor absoluto (%) e varia entre os 1,21% e os 2,97%.

Estudo da resposta do monitor individual em função do débito de dose

A resposta do monitor individual *Vertec Bleeper Sv*, em função do débito de dose, é ilustrada na Figura 3.

Discussão

Verificação Metrológica

Os dosímetros eletrónicos individuais são monitores de proteção radiológica aptos para a realização da dosimetria individual, isto é, permitem registar a dose de radiação recebida pelo utilizador durante a sua atividade profissional^{2-5,10}. No entanto, para além de monitorizar a dose de radiação recebida, os monitores individuais de proteção radiológica de alarme e de leitura direta permitem também uma avaliação do nível de radiação do local de trabalho, nomeadamente se existe um incorreto procedimento de trabalho ou ainda uma instalação com problemas de blindagem, prevenindo exposições desnecessárias e acidentais⁵.

A verificação metrológica do monitor individual de proteção radiológica *Vertec Bleeper Sv* pretende verificar o seu desempenho metrológico na medição da grandeza $H_p(10)$.

Analisando a Figura 1, verifica-se que o dosímetro eletrónico pessoal *Vertec Bleeper Sv* possui uma resposta relativamente linear e muito próxima do V.C.V. para doses de radiação inferiores a 100 μSv , o que corresponde a um bom desempenho deste monitor na medição da grandeza $H_p(10)$ para estes valores. A norma ISO 4037-3¹¹ indica que os valores da resposta relativa do monitor individual em proteção radiológica não devem exceder os $\pm 20\%$ do V.C.V. Assim sendo, confere-se que esta condição é cumprida apenas para valores inferiores a 400 μSv . Entre os 400 μSv e os 8000 μSv constata-se uma elevada subestimação

na resposta que poderá estar relacionada com um efeito de saturação do detetor *Geiger-Müller*, constituinte deste monitor individual, dado o longo tempo-morto associado a este tipo de detetor⁸.

No entanto, esta subestimação, que ocorre maioritariamente na última escala estudada deste monitor individual de proteção radiológica, não impede o seu uso, dado que, salvo situações muito esporádicas, o profissional não é exposto a doses tão elevadas. De facto, o valor máximo registado anualmente de $H_p(10)$ para um Técnico de Medicina Nuclear, em Portugal¹⁵ foi de 10 mSv. Salienta-se que este valor se encontra abaixo do limite anual estipulado para doses ocupacionais: 20 mSv⁴.

Estudo da resposta do monitor individual em função da energia

Este estudo foi efetuado para raios X de média e baixa energia e fótons gama do ^{137}Cs e do ^{60}Co , permitindo construir um intervalo de energias aproximado ao utilizado nos laboratórios que utilizam radiação ionizante no seu dia-a-dia.

Como se evidencia na Figura 2, o comportamento da resposta deste monitor individual de proteção radiológica é, em geral, análogo ao comportamento típico da resposta dos detetores *Geiger-Müller*, onde não existe uma relação entre a resposta do detetor e a energia a que é exposto⁸.

Verifica-se que a resposta do dosímetro eletrónico individual para energias inferiores a 33 keV é muito baixa, sendo inferior a 50% do valor real com o qual o monitor foi irradiado, facto também constatado por Texier, et al.⁷ e por Suliman¹, que averiguaram uma subestimação superior a 30% para energias inferiores a 50 keV. Estes valores demonstram a ineficácia do detetor para detetar fótons provenientes de baixas energias, confirmando o limite inferior de energia fornecido pelo fabricante (45 keV)⁶.

Porém, dado que nos serviços de saúde a maioria das energias de radiação utilizadas é superior a 45 keV não existe o risco de uma subestimação na leitura do dosímetro eletrónico pessoal no dia-a-dia. Nas práticas que utilizam

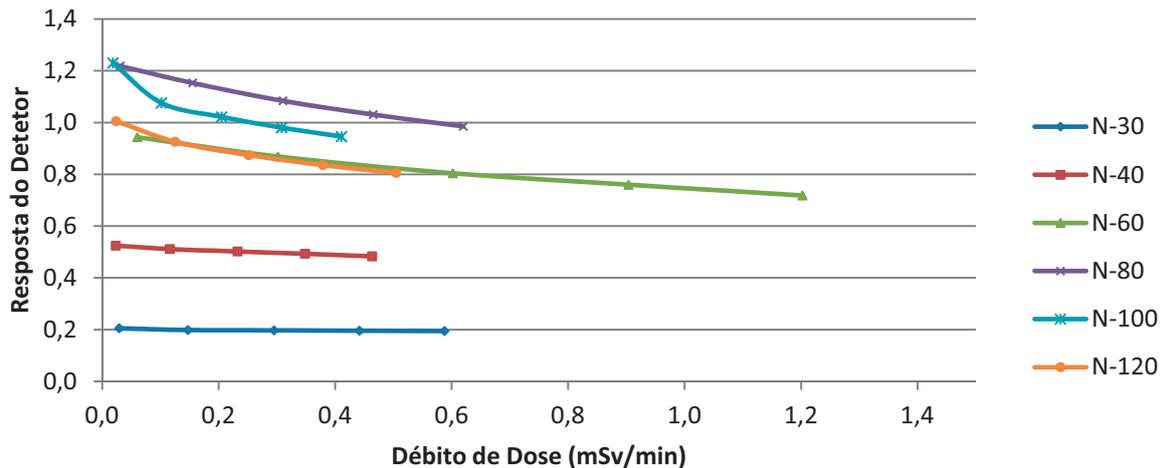


Figura 3: Resposta do monitor individual face a vários débitos de dose obtidos com as intensidades de corrente elétrica de 1, 5, 10, 15 e 20 mA.

energias de radiação inferiores a 45 keV, a utilização deste dosímetro requer uma atenção especial para a elevada subestimação da dose de radiação recebida que pode ser visualizada no *display* do monitor individual.

Estudo da resposta do monitor individual em função do débito de dose

Ao analisar a dependência da resposta do monitor individual em função do débito de dose, como se observa na Figura 3, verifica-se que, à medida que o débito de dose aumenta, a resposta do detector diminui.

Para as qualidades de radiação N-30 e N-40, com energias mais baixas, o decréscimo da resposta é menor do que para as restantes qualidades de radiação, sendo este decréscimo na resposta de 1,1% para N-30 e de 4,1% para N-40. Já para as outras qualidades de radiação, o decréscimo observado na resposta é muito maior, sendo de 22,5% para N-60, 52,0% para N-80, 28,5% para N-100 e de 20,0% para N-120. É notório que o decréscimo da resposta com o aumento do débito de dose aumenta até à energia de 65 keV (N-80) para seguidamente diminuir até aos 100 keV (N-120). Esta subestimação da resposta do detector à medida que o débito de dose aumenta foi já anteriormente reportada⁹ para o dosímetro *Vertec Bleeper Sv*.

Constata-se, também, que a resposta de deteção para as qualidades de radiação N-30 e N-40 é muito baixa, o que, mais uma vez, certifica o limite inferior de energia fornecido pelo fabricante.

Conclusão

Os dosímetros de leitura direta e de alarme permitem a obtenção de uma medição instantânea da dose de radiação recebida, possibilitando ao seu utilizador, sempre que necessário, a alteração de práticas incorretas em tempo útil. A resposta dos dosímetros eletrónicos pessoais, nomeadamente do dosímetro *Vertec Bleeper Sv*, é dependente da energia da radiação, sendo adequada para práticas que se desenvolvam a partir dos 45 keV e até um limite superior de 6 MeV. Este monitores de proteção radiológica são

também dependentes do débito de dose, ocorrendo uma subestimação da grandeza $H_p(10)$ para elevados débitos de dose.

Deste modo, a utilização do dosímetro eletrónico pessoal *Vertec Bleeper Sv* é recomendada para práticas que excedam o limite inferior estabelecido e confirmado de 45 keV, evocando uma possível subestimação da leitura do dosímetro em práticas que envolvem elevados débitos de dose.

Referências Bibliográficas

1. Suliman II, Yousif EH, Beineen AA, Yousif BE, Hassan M. Performance testing of selected types of electronic personal dosimeters used in Sudan. *Radiat Meas.* 2010;45(10):1582-4.
2. International Atomic Energy Agency. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Vienna: IAEA; 1996.
3. International Atomic Energy Agency. Occupational radiation protection. Vienna: IAEA; 1999.
4. Valentin J, editor. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Washington, DC: Elsevier; 2007.
5. Ortiz-Lopez P, editor. Applying radiation safety standards in nuclear medicine. Vienna: IAEA; 2005. ISBN 92-0-111104-5
6. Radiation Components Ltd. "Bleeper Sv" radiation monitor [Internet]. Wuppertal: European Logistic Partners; 2007 [updated 2007 Nov 26; cited 2010 Dec 15]. Available from: <http://www.elp-gmbh.de/uploads/x-ray/151010.pdf>.
7. Texier C, Itié C, Servièrè H, Gressier V, Bolognese-Mil-sztajn T. Study of the photon radiation performance of electronic personal dosimeters. *Radiat Prot Dosimetry.* 2001;96(1-3):245-9.
8. Knoll GF. Radiation detection and measurement. 3rd ed. Washington, DC: Wiley; 2000. ISBN 978-0471073383
9. McCaffrey JP, Shen H, Downton B. Dose rate dependency of electronic personal dosimeters measuring X- and γ -ray radiation. *Radiat Prot Dosimetry.* 2008;131(2):229-35.

10. Health Canada. Safety code 34: radiation protection and safety for industrial X-ray equipment [Internet]. Vancouver: Health Canada; 2007 [cited 2011 Jan 2]. Available from: http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/safety-code_34-securite/foreword-avant_propos-eng.php.
11. International Organization for Standardization. ISO 4037-3 – X and gamma reference radiation for calibrating dose-meters and dose rate 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. Geneva: ISO; 1999.
12. Laboratoire National Henri Becquerel. Recommended atomic and nuclear data [Internet]. Gif-sur-Yvette: LNHB; 2010 [updated May 2010; cited 2011 Jan 2]. Available from: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.html.
13. Bé MM, Chisté V, Dullieu C, Browne E, Baglin C, Chechev V, et al. Monographie BIPM-5: table of radionuclides. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 2006.
14. Kessler W. ISO/BIPM guide: uncertainty of measurement. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 1999.
15. Pinto I, Schiappa J, Parafita R, Carvoeiras P, Martins B, Trindade H, et al. Avaliação da exposição radiológica dos profissionais de saúde [Health professionals radiological exposure evaluation] [Internet]. Medical Consult; 2008 [cited 2011 Jan 2]. Available from: <http://www.medical-consult.pt/useruploads/files/avaliacaoexposicao radiologica-profissionais-saude-sppcr.pdf>. Portuguese

Artigo recebido em 10.08.2011 e aprovado em 26.01.2012.