

Cálculo da incerteza da avaliação do $H_p(10)$ para um sistema de dosimetria termoluminescente

M S Ferreira¹, E R Silva¹, C L P. Mauricio¹

¹ Instituto de Radioproteção e Dosimetria / Comissão Nacional de Energia Nuclear

E-mail: max.das.ferreira@gmail.com

Resumo: A plena interpretação dos resultados da avaliação de doses só pode ser realizada quando a incerteza da medida é conhecida. O objetivo deste estudo é calcular a incerteza do sistema de dosimetria TL do LDF/IRD para a avaliação do $H_p(10)$ para fótons. Para isso, foram realizadas medições, extração de informações em documentos e cálculos das incertezas baseados no GUM da ISO. A dependência energética e angular é a fonte de incerteza mais relevante para a incerteza combinada, $u_c(y)$, e expandida (U). Para 10 mSv, foi obtido $u_c(y) = 1,99$ mSv e $U = 3,98$ mSv para 95% de grau de confiança.

Palavras-chave: fontes de incerteza, monitoração individual, dosimetria termoluminescente.

Abstract: Full interpretation of dose assessment only can be performed when the uncertainty of the measurement is known. The aim of this study is to calculate the uncertainty of the TL dosimetry system of the LDF/IRD for evaluation of $H_p(10)$ for photons. It has been done by experimental measurements, extraction of information from documents and calculation of uncertainties based on ISO GUM. Energy and angular dependence is the most important source to the combined $u_c(y)$ and expanded (U) uncertainty. For 10 mSv, it was obtained $u_c(y) = 1,99$ mSv and $U = 3,98$ mSv for 95% of coverage interval.

Keywords: uncertainty sources, individual monitoring, thermoluminescent dosimetry.

1. INTRODUÇÃO

Para a realização de práticas que envolvam exposição a radiações ionizantes, os trabalhadores devem utilizar dosímetros pessoais capazes de medir a dose recebida pelo indivíduo durante o período de monitoração (ICRP, 2007). Essa avaliação deve ser uma estimativa da dose efetiva recebida pelo trabalhador e o sistema dosimétrico usado para medições deve apresentar rastreabilidade metrológica.

A grandeza operacional adotada internacionalmente para a estimativa da dose

efetiva de indivíduos expostos a campos externos de radiação é o equivalente de dose individual – $H_p(10)$, obtido através da utilização de dosímetros individuais posicionados no tórax dos trabalhadores (ICRU, 1993). Os resultados obtidos pela monitoração geralmente são reportados através da emissão de relatórios mensais de doses.

Apesar dos valores de doses reportados já permitirem a adoção de medidas de proteção radiológica pertinentes, a plena interpretação dos resultados e o atendimento aos requisitos de exatidão e precisão, só podem ser realizados

1

quando a incerteza da medida é conhecida (BIPM, 2008). Para isso, é essencial a identificação das fontes de incerteza do sistema dosimétrico e a contribuição de cada uma para a incerteza final da medição.

Na monitoração individual, mesmo que a incerteza não esteja expressa no relatório de doses, o seu valor precisa ser estimado. Não obstante, essa estimativa não é uma tarefa trivial, uma vez que isto requer, pelo menos, a realização das seguintes ações: identificação de todas as grandezas e parâmetros de influência; identificação das principais fontes de incerteza; realização de medições experimentais para a quantificação da incerteza de cada fonte; aplicação de uma metodologia adequada para o cálculo da incerteza padrão combinada e expandida associada ao sistema de dosimetria (EC, 2009).

Apesar da revisão bibliográfica indicar quais as grandezas e parâmetros que influenciam a medida da dose para diferentes técnicas de dosimetria, ainda não estão bem difundidos trabalhos que quantificam a contribuição de cada fonte de incerteza ou que descrevem os cálculos da incerteza combinada e expandida para um sistema dosimétrico em operação (VANDIJK, 2007; GILVIN, 2011). Assim, é importante um estudo que fundamente e aplique uma metodologia para o cálculo da incerteza das medições de um sistema dosimétrico, descrevendo as atividades experimentais requeridas e explicitando o passo a passo adotado.

Este estudo tem como objetivo calcular a incerteza padrão combinada e expandida do sistema de dosimetria termoluminescente (TL) utilizado pelo Laboratório de Dosimetria de Fótons do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (LDF/IRD) para a monitoração individual de corpo inteiro de trabalhadores expostos a campos de fótons. Serão apresentados os procedimentos executados e a metodologia de cálculo aplicada, de tal forma que possam ser reproduzidos por outros serviços de monitoração individual.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DOSIMÉTRICO

2.1. O dosímetro e o leitor de TLD

O sistema de dosimetria TL utilizado pelo IRD para a monitoração individual utiliza o monitor de radiação modelo MTS-N da fabricante RadPro, com 2 detectores termoluminescentes (TLD) do tipo LiF:Mg,Ti. Um TLD está posicionado sob um filtro de alumínio de 1 mm de espessura e o outro está numa posição sem filtro, sob os materiais plásticos que compõem o dosímetro. Na figura 1, estão apresentados o dosímetro completo e o cartão com os TLD nas posições utilizadas.

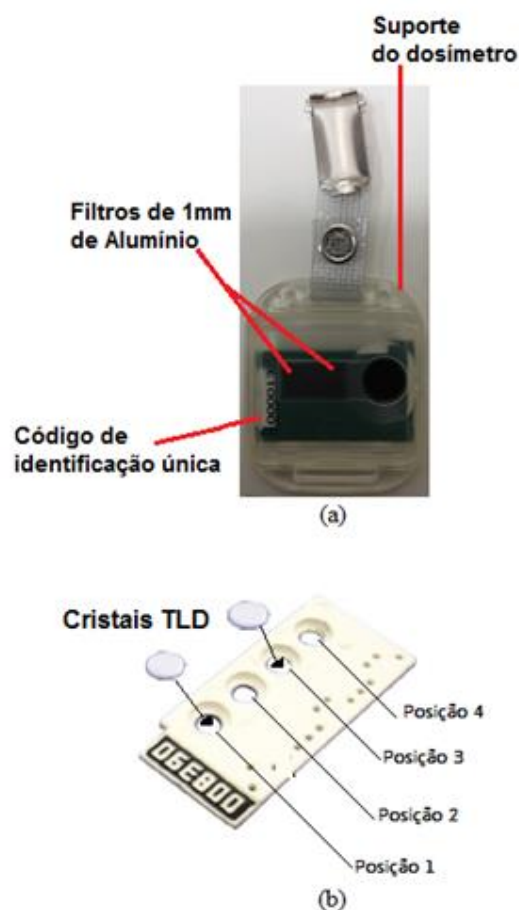


Figura 1. Dosímetro utilizado na monitoração individual. Em (a) o dosímetro completo e em (b) o destaque para os cristais TLD e suas posições.

O leitor de TLD utilizado na avaliação dos dosímetros é o modelo automático RA-2000, também da fabricante RadPro. A leitura é realizada utilizando gás nitrogênio aquecido.

2.2. Procedimentos técnicos

Antes dos dosímetros serem utilizados na rotina de monitoração, é realizado um tratamento térmico dos TLD para eliminar possíveis sinais TL prévios (*annealing*). Esse primeiro annealing é realizado em um forno pré-programável, a uma temperatura de 400°C por 1 hora e de 100°C por 2 horas. Em seguida, é realizado o procedimento para formação dos lotes, em que são agrupados dosímetros cujos TLD apresentam desvio padrão percentual das leituras menor ou igual a 5%. Definido o lote de TLD, os dosímetros são montados e um subgrupo é irradiado para obtenção do fator de calibração do lote.

Durante a rotina de monitoração, antes de serem enviados ao usuário, os TLD são submetidos a um *annealing* utilizando o próprio leitor em temperatura de 300 °C por 13,5 segundos. Os dosímetros são montados e enviados ao cliente que deve utilizá-los durante 1 mês. Após o recebimento dos dosímetros, estes são desmontados e submetidos a um tratamento térmico pré-leitura a temperatura de 150 °C por 13,5 segundos.

Um procedimento de controle de qualidade é realizado com o objetivo de avaliar a estabilidade do sistema dosimétrico através da avaliação de dosímetros com dose conhecida. A leitura dos dosímetros é realizada com o aquecimento não linear a 300 °C durante 13,5 segundos, cujo resultado é registrado em contagens. Na figura 2, pode ser visualizado o fluxo de procedimentos executados periodicamente na rotina de monitoração.

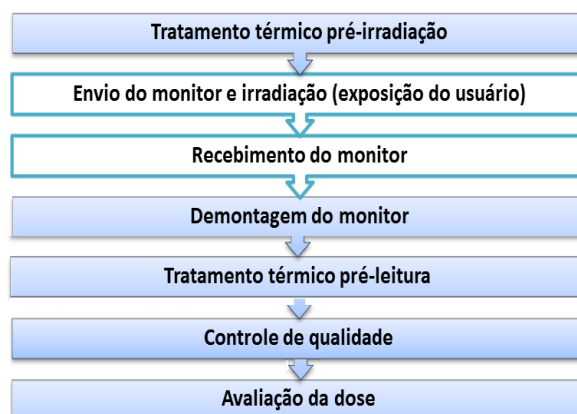


Figura 2. Fluxo dos principais procedimentos realizados na rotina. Com fundo sólido estão os procedimentos técnicos realizados em laboratório (condições ambientais controladas).

Para cada procedimento realizado pelo Serviço de Monitoração Individual Externa (SMIE), as grandezas e parâmetros de influência devem ser identificados para determinação das principais fontes de incerteza do sistema dosimétrico.

2.3. Calibração do sistema dosimétrico

O sistema é calibrado para a avaliação da grandeza equivalente de dose individual - $H_p(10)$. Para isso, são realizadas irradiações com fonte de Cs-137 utilizando um campo padronizado com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI).

Os dosímetros são colocados sobre o fantoma padronizado pela ISO (*ISO Slab Phantom*) (ISO, 1999), e são irradiados frontalmente em feixe calibrado em kerma no ar, com diferentes doses. Um fator é aplicado para converter o valor da dose em kerma no ar para $H_p(10)$, considerando a energia dos fótons do Cs-137 e o ângulo de 0°. Os resultados das irradiações com diferentes doses são plotados em um gráfico (*Avaliação do dosímetro* \times *Dose*), obtendo-se uma reta cujo inverso de seu coeficiente angular é o valor do Fator de Calibração do lote (FC).

2.4. Determinação da dose avaliada

A leitura do dosímetro é obtida através da média das leituras dos TLD contidos no dosímetro (posição 1 e 3), e é registrada em contagens. Os dosímetros enviados aos usuários de uma instalação monitorada são acompanhados por um dosímetro de controle, cujo valor avaliado está associado à dose devida à radiação de fundo. Esse valor deve ser descontado do valor da leitura do dosímetro do usuário, obtendo-se a leitura líquida:

$$L_{Líquida} = L_{usuário} - L_{Controle} \quad (1),$$

em que:

$L_{Líquida}$: leitura líquida do dosímetro do usuário;

$L_{usuário}$: leitura bruta do dosímetro do usuário;

$L_{Controle}$: leitura bruta do dosímetro de controle.

O tratamento térmico pré-avaliação normalmente adotado para o LiF:Mg,Ti utiliza temperaturas que exigem que o TLD seja retirado do dosímetro, o que não é viável em um sistema automático. Assim, no sistema dosimétrico do LDF/IRD, esse tratamento é realizado no próprio leitor de TLD, o que reduz sensivelmente a eficiência do tratamento em eliminar os picos de emissão de luz mais instáveis à temperatura ambiente. Assim, fez-se necessário a introdução de um fator de correção do desvanecimento da reposta (fading), obtido através de testes de desempenho do sistema.

O cálculo da dose é realizado utilizando a seguinte equação:

$$H_P(10) = L_{Líquida} \times FC \times f_{Fading} \quad (2)$$

em que:

FC : fator de calibração do lote;

f_{Fading} : fator de correção do fading.

3. DISCUSSÃO SOBRE AS PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA DO SISTEMA DE DOSIMETRIA TL

A partir de estudo prévio (FERREIRA, 2015) baseado em revisão bibliográfica, na análise técnica da rotina de um laboratório de dosimetria TL, e em dados experimentais preliminares, foram identificadas as possíveis fontes de incerteza de um sistema de dosimetria TL. A partir do referido estudo, foram realizadas medições experimentais que permitiram determinar quais dessas fontes são as principais. Nesta seção é apresentada uma discussão sobre essas fontes de incertezas.

3.1. Homogeneidade do lote de dosímetros e reprodutibilidade do sistema

A homogeneidade do lote de dosímetros indica a variação das leituras desses ao serem expostos ao mesmo valor de dose, em condições de irradiação idênticas, sendo influenciada principalmente pela variação da sensibilidade entre os TLD do mesmo lote.

A reprodutibilidade da medição representa o grau de concordância entre os resultados das medições, refletindo a capacidade do sistema dosimétrico em reproduzir resultados que possam ser considerados estatisticamente iguais para irradiações com a mesma dose (BIPM, 2012). Para dosimetria TL, é necessário que haja reprodutibilidade do ciclo de tratamentos térmicos, das condições de calibração e na etapa de leitura do sinal TL (OBERHOFER, 1981). A homogeneidade do lote de dosímetros e a reprodutibilidade do sistema dosimétrico são fontes de incerteza relevantes.

3.2. Dependência energética e angular

Ao submeter um dosímetro a campos de irradiação com a mesma dose, é desejável que sua avaliação independa da energia da radiação incidente, porém, isto não ocorre na prática. Quando essa variação é grande, considera-se que o dosímetro apresenta

alta dependência energética. A dependência energética pode ser uma questão crítica na avaliação das doses, pois a curva de calibração é obtida através da irradiação em uma determinada qualidade de referência. No caso do deste trabalho, é usado um feixe padronizado e rastreado de Cs-137. Porém, o dosímetro pode ser utilizado em campos com energias bem distintas daquelas utilizadas na calibração, por exemplo, em campos com raios X de baixa energia.

Geralmente os dosímetros utilizados no processo de calibração são irradiados frontalmente por um feixe de referência com angulação de 0° em relação à direção normal do dosímetro, ou seja, o feixe incide perpendicularmente à superfície do dosímetro. Porém, nas atividades práticas, o indivíduo normalmente está exposto a feixes de radiação que incidem sobre seu dosímetro com diferentes ângulos de entrada, logo as condições de utilização diferem das condições de calibração também quando se trata de ângulo de incidência. Assim, a avaliação do dosímetro é modificada a depender desse ângulo de incidência, o que caracteriza uma dependência angular do monitor (MILJANIC et al, 2003).

A dependência energética e angular são fontes de incertezas dependentes entre si, ou seja, a variação de uma acarreta na variação da outra. Assim, para fins de simplificação do cálculo da incerteza, essas grandezas podem ser agrupadas, definindo-se uma única fonte de incerteza, cujo valor reflete a contribuição combinada das duas.

3.3. Obtenção do fator de calibração e linearidade da leitura dos TLD

Para obtenção do fator de calibração, os dosímetros são expostos a campos de irradiação que apresentam rastreabilidade a campos padronizados de referência (SOARES, 2002). Porém, tais irradiações possuem uma incerteza

associada que deve ser propagada para a obtenção da incerteza combinada do sistema dosimétrico.

Além das irradiações, as aproximações realizadas para obtenção da reta que permite a determinação do fator de calibração também podem contribuir para a incerteza final da medida. Esta contribuição está relacionada à linearidade da leitura dos dosímetros. Esta indica a proporcionalidade entre as contagens de sinais TL e a dose absorvida pelo detector (BAUK, 2011).

3.4. Fontes de incertezas associadas às condições ambientais

A estabilidade do sistema dosimétrico em diferentes condições ambientais está relacionada à capacidade do detector TL em manter as cargas aprisionadas em condições ambientais distintas como, por exemplo, em temperaturas mais elevadas. Fatores como temperatura, umidade e luz podem provocar a perda ou aumento do sinal TL de tal forma que a leitura do detector possa variar no período entre a irradiação e a sua avaliação. Assim, para que um dosímetro possa ser utilizado em monitoração individual, é importante que o desvanecimento (fading) ou aumento de seu sinal não sejam significativos nas condições ambientais normalmente observadas no armazenamento, no transporte e na utilização do monitor (BILSKI P, 2013).

As fontes de incerteza associadas às condições ambientais são: influência da luz, temperatura e umidade sobre o dosímetro. Especificamente para o sistema dosimétrico descrito neste estudo, o fator de correção de fading adotado apresenta-se como uma fonte de incerteza relevante na avaliação da dose, mesmo em condições padrão de testes.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção da incerteza associada a cada uma das principais fontes de incerteza do sistema dosimétrico, foram realizadas medições experimentais e a extração de informações de

certificados e outros documentos de referência. Com os resultados obtidos, foi possível aplicar uma metodologia de cálculo das incertezas baseada no Guia para Expressão da Incerteza de Medição da ISO (BIPM, 2008) e adaptada para sistemas de dosimetria TL na avaliação do $H_p(10)$ (EC, 2009).

Para execução da etapa experimental, todas as irradiações foram realizadas com doses de 10 mSv utilizando uma fonte de Cs-137 e uma placa de acrílico para garantir o equilíbrio eletrônico. Os dosímetros foram avaliados seguindo os procedimentos técnicos adotados na rotina, incluindo os tratamentos térmicos pré-irradiação e pré-leitura.

Para o cálculo da incerteza associada à homogeneidade do lote de TLD, foram preparados, irradiados e avaliados 60 dosímetros, enquanto que para a reprodutibilidade, foram utilizados 12 dosímetros. Para determinação da incerteza associada à dependência energética e angular, foram utilizados resultados reportados em um documento de referência da Comunidade Europeia (EC, 2009).

Para o cálculo da incerteza do fator de correção do fading, 20 dosímetros foram irradiados e separados em 2 grupos de 10 dosímetros cada. O primeiro grupo foi avaliado após 1 dia da irradiação, e o segundo grupo após 30 dias da irradiação.

Para obtenção da incerteza associada ao fator de calibração, 12 dosímetros foram preparados. Desses, 10 foram irradiados e 2 foram utilizados como dosímetros de controle. Os dosímetros foram avaliados e o FC foi obtido calculando-se a razão entre a dose de referência e a média das contagens líquidas.

As incertezas associadas às condições ambientais, ao efeito da luz e à linearidade da leitura do sistema dosimétrico foram agrupadas como “outras”. O valor para estas incertezas foi estimado a partir dos resultados dos testes de

desempenho iniciais realizados e reportados pelo LDF/IRD.

Para cada fonte de incerteza, os resultados dos testes indicam um valor central esperado para os valores avaliados pelos dosímetros. Em torno desse valor central, foi definido um intervalo simétrico baseado nos valores extremos das medições realizadas ou obtidas a partir de certificados ou outros documentos referência. Definido esse intervalo, foi determinada a função de distribuição de probabilidades a ser adotada para o cálculo da incerteza associada a cada fonte.

Para o cálculo da incerteza padrão combinada, as incertezas foram propagadas, aplicando-se um coeficiente de sensibilidade que indica quanto o valor da grandeza avaliada varia de acordo com a variação da grandeza de influência, conforme indicado na equação (3). A incerteza expandida foi calculada usando-se a equação (4), para um fator de abrangência igual a 2, considerando um intervalo de confiança de 95%.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (3)$$

em que:

$u_c(y)$: incerteza padrão combinada da medida da grandeza avaliada, $H_p(10)$;

c_i : coeficiente de sensibilidade;

$u(x_i)$: incerteza da fonte x_i .

$$U = u_c(y) \cdot k \quad (4)$$

em que:

U : incerteza expandida da medida da grandeza avaliada, $H_p(10)$;

k : fator de abrangência

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1, são apresentados os valores calculados para as principais fontes de incerteza

do sistema de dosimetria TL para a avaliação de $H_p(10)$ para fótons, usado no LDF/IRD, bem como os parâmetros que fundamentaram o cálculo.

A análise da tabela revela que a principal fonte de incerteza é a dependência energética e angular do sistema dosimétrico. Esse resultado já era esperado pela variação teórica do comportamento da energia absorvida no material do TLD (fluoreto de lítio) e no tecido e a impossibilidade de identificação da energia e ângulo de irradiação corretos. O sistema é calibrado utilizando fonte de Cs-137, porém é utilizado em campos de diferentes energias e ângulos de radiação, aumentando a incerteza da medição.

A necessidade de introdução de um fator de correção do fading gerou uma fonte de incerteza adicional ao sistema. Apesar disso, a utilização do referido fator de correção permitiu reduzir sensivelmente a incerteza associada a fatores climáticos, especialmente temperatura.

A incerteza do fator de calibração é basicamente impactada pela incerteza reportada no certificado de calibração emitido pelo laboratório de irradiação e possui contribuição para incerteza na mesma ordem daquelas associadas à homogeneidade do lote de dosímetros e à reprodutibilidade do sistema dosimétrico.

O agrupamento de fontes de incerteza de baixa contribuição relativa e cujos valores não foram obtidos por este estudo, mas sim em outros documentos, resultou em uma contribuição relativa pequena, não impactando consideravelmente a incerteza final da medida.

A partir dos resultados apresentados na tabela 1, foi calculado o valor da incerteza padrão combinada.

O valor calculado para a incerteza padrão combinada foi de 1,99 mSv para uma dose de 10 mSv. Considerando o intervalo de confiança de 95%, a incerteza expandida foi de 3,98 mSv.

Tabela 1: Principais fontes de incerteza do Sistema de Dosimetria TL do IRD e informações para o cálculo da incerteza combinada.

Grandeza de influência	Un.	Valor esperado	Distribuição	Incerteza	C_i
Homogeneidade do lote	mSv	10	Normal	$u_{Hom} = \frac{1}{2}(11 - 9)/3 = 0,33$	1 mSv/mSv
Reprodutibilidade	mSv	10	Normal	$u_{Rep} = \frac{1}{2}(10,8 - 9,2)/3 = 0,27$	1 mSv/mSv
Dependência energética e angular	mSv	10,5	Normal	1,63	1 mSv/mSv
Correção do fading	mSv	11	Retangular	$u_{Fad} = \frac{1}{2}(12 - 10)/\sqrt{3} = 0,58$	1 mSv/mSv
Obtenção do FC	ctg	1281490	Normal	$u_{FC} = \frac{1}{2}(140964 - 115334)/3 = 4272$	$7,8 \times 10^{-6}$ mSv/ctg
Outras (Condições climáticas, luz e Linearidade)	mSv	10	Retangular	0,82	1 mSv/mSv

6. CONCLUSÕES

A dependência energética e angular é a fonte de incerteza mais relevante na avaliação da dose em $H_p(10)$. Isso é reflexo da possibilidade de utilização dos dosímetros em diferentes campos de irradiação com energias e ângulos bem distintos daqueles adotados na calibração. Para doses menores do que 10 mSv, a incerteza relativa deve aumentar, especialmente devido ao aumento da incerteza associada à reprodutibilidade do sistema.

As demais fontes de incerteza estão na mesma ordem de grandeza e, isoladamente, cada uma não contribui de forma relevante para a incerteza padrão combinada e expandida.

7. Referências

BAUK, S.; ALAM, MD. S.; ALZOUBI, A. S. Precision of Low-Dose Response of LiF:Mg, Ti Dosimeters Exposed to 80 kVp X-Ray. **Journal of Physical Science**, Gelugor, vol. 22, n. 1, pp. 125–130, 2011.

BILSKI, P.; BERGER, T.; HAJEK, M.; TWARDAK, A.; KOERNER, C.; REITZ, G. Thermoluminescence fading studies: Implications for long-duration space measurements in Low Earth Orbit. **Radiation Measurements**, Amsterdã, vol. 56, pp. 303–306, set. 2013.

BIPM. **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement**: JCGM 100. Paris, 2008. 120 p.

BIPM. **International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)**: JCGM 200. Paris, 2012. 91 p.

EC. **Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation**: RP 160. Luxembourg, 2009. 128 p.

FERREIRA, M. S., SILVA, E.R., MAURICIO, C.L.P., 2015. Sources of uncertainty in individual monitoring for photographic, TL and OSL dosimetry techniques. In: International Nuclear

Atlantic Conference, 2015, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 2015.

GILVIN, P.J., PERKS, C.A. Practical low dose limits for passive personal dosimeters and the implications for uncertainties close to the limit of detection. **Radiation Protection Dosimetry**, Oxford, vol. 144 (1-4), pp. 102-106, mar. 2011.

ICRP. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**: ICRP Publication 103. Essen, 2007. 332 p.

ICRU. **Quantities and Units for Use in Radiation Protection**: Report 51. Bethesda, 1993. 19 p.

ISO. **X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters 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, ISO 4037-3. Geneva, 1999, 46 p.

MILJANIC, S., KNEZEVIC, Z., STUHEC, M., RANOGAJEC-KOMOR, M., KRPAN, K., Vekić, B. Energy dependence of new thermoluminescent detectors in terms of $HP(10)$ values. **Radiation Protection Dosimetry**, Oxford, vol. 106, n. 3, pp. 253-256, set. 2003.

OBERHOFER, M., SCHARMANN, A. **Applied Thermoluminescence Dosimetry**. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1981. 414p.

SOARES, C. G. National and international standards and calibration of thermoluminescence dosimetry systems. **Radiation Protection Dosimetry**, Oxford, vol. 101, n. 1-4, pp. 167-171, ago. 2002.

VAN DIJK, J.W.E., 2007. Evaluating the uncertainty in measurement of occupational exposure with personal dosimeters. **Radiation Protection Dosimetry**, Oxford, vol. 125, n. 1-4, pp. 387-394, jan. 2007.