



PROPOSTA DE REQUISITOS DE DESEMPENHO NO BRASIL PARA SISTEMAS DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA DE EXTREMIDADE PARA FÓTONS EMPREGANDO A TÉCNICA DE DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE

Paulo G. Cunha¹, Cláudia L. P. Maurício², Marcelo M. Martins³

¹ Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, Brasil, pcunha@ird.gov.br, ² claudia@ird.gov.br, ³ marcelo@ird.gov.br

Sumário: Este trabalho visa apresentar uma proposta de requisitos de desempenho que possa subsidiar a elaboração de Regulamentos Técnicos para a autorização pela Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN do funcionamento no Brasil de sistemas de monitoração individual externa de extremidades (anel/pulseira) para fótons, usando-se a técnica de dosimetria termoluminescente. Os requisitos baseados na norma ISO 12794 “Radiation protection – Individual thermoluminescence dosimeters for extremities and eyes” foram modificados a partir da experiência dos autores na prestação, desde 1972, deste tipo de serviço e na realização de ensaios de desempenho para a caracterização de monitores individuais passivos.

Palavras-chave: monitoração individual de extremidade, ensaios de desempenho, TLD, ISO 12794.

1. INTRODUÇÃO

Em proteção radiológica, a verificação de que um padrão preestabelecido de segurança numa instalação nuclear, radioativa ou médica foi alcançado é realizado por meio de programas de monitoração. Pode-se considerar resumidamente que na proteção radiológica de uma instalação existem duas fases operacionais [1]:

- ◆ Planejamento: onde, por meio de soluções de engenharia, da elaboração e aplicação de procedimentos são criados os meios necessários para que as doses anuais do trabalhador e/ou de público se situem em níveis inferiores aos valores que foram estabelecidos durante a fase de projeto;
- ◆ Confirmatória: onde, por meio de programas de monitoração (individual, área ou ambiental), é demonstrado que as rotinas acontecem conforme planejado.

O principal propósito da monitoração individual é fornecer um acompanhamento periódico da exposição ocupacional do trabalhador para confirmação ou não de boas práticas de trabalho [1,2]. Dependendo da natureza e das práticas de trabalho, um programa de monitoração individual possui também o intuito de fornecer [3]:

- Dados para estudos epidemiológicos e/ou análises sobre risco/benefício;

- Dados para fins médicos e/ou legais;
- Informação sobre a radioproteção no ambiente de trabalho, em especial detectar mudanças nas condições de trabalho do indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE);
- Informação sobre doses altas não planejadas; tais como aquelas que eventualmente ocorrem em acidentes.

Os monitores individuais podem ser classificados como (a) ativos ou (b) passivos. No primeiro caso (a), entende-se como ativo aquele monitor que fornece a informação direta e imediata sobre a dose ou a taxa de dose do trabalhador; no segundo caso (b), entende-se como passivo aquele monitor que necessita de um tratamento posterior, em laboratório, para se obter a informação sobre a dose do trabalhador, integrada durante o seu período de uso [4].

O emprego da monitoração individual de extremidade não substitui ou torna desnecessária a monitoração individual para corpo inteiro [5]. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) não possui norma que defina os critérios específicos para homologação de serviços de monitoração individual de extremidade em campos de radiação de fótons.

Além de recursos humanos qualificados e de um sistema de gestão da qualidade, um serviço de monitoração individual necessita de um sistema de medição que atenda determinados requisitos técnicos, além de possuir rastreabilidade metrológica. A implantação de um sistema de monitoração individual deve seguir, *a priori*, as seguintes etapas: aquisição ou desenvolvimento do sistema de medição, calibração e caracterização deste sistema.

De uma forma geral, um monitor individual passivo de extremidade para que possa ser empregado satisfatoriamente deve atender aos seguintes requisitos mínimos [5,6]:

- Baixo custo, principalmente se o monitor for descartável;
- Desvanecimento da leitura do detector desprezível ou possível de ser corrigido no algoritmo da dose;
- Estabilidade sobre condições climáticas adversas;
- Identificação inequívoca do usuário;
- Insensibilidade a campos elétricos e magnéticos;

- Larga faixa de medida da dose; desde valores inferiores ao nível de registro (NR) definidos em norma até valores altos, no caso de acidentes radiológicos ou nucleares;
- Limite inferior de detecção (LID) abaixo do nível de registro (NR) na faixa de dose e energia para a qual o monitor é destinado;
- Resistência mecânica;
- Resposta relacionada à grandeza equivalente de dose pessoal - $H_p(0,07)$.

No Brasil, os laboratórios prestadores de serviço de dosimetria relacionada à radioproteção da população, do trabalhador e do meio ambiente, executadas com a finalidade de atender aos requisitos de licenciamento e fiscalização da CNEN devem ser autorizados a funcionar pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) [7]. Cada Laboratório deve demonstrar que o seu sistema de medição satisfaz aos critérios estabelecidos em algum

regulamento ou norma. Atualmente, todos os serviços de monitoração individual externa de fótons para corpo inteiro autorizados a funcionar, satisfazem os critérios técnicos e administrativos definidos em portaria da CNEN de 1995 [8]. Entretanto, outros serviços de monitoração individual externa, como a de extremidade para fótons ou de corpo inteiro para nêutrons não estão regulamentados.

2. A NORMA ISO 12794

Em 2000, foi editada a norma ISO 12794 “Nuclear Energy – Radiation Protection – Individual Thermoluminescence Dosimeters for Extremities and Eyes” [9]. Conforme apresentado na Tabela 1, esta norma estabelece um conjunto de ensaios e critérios de desempenho para medições de doses de extremidade empregando a técnica de dosimetria termoluminescente de IOEs na grandeza $H_p(0,07)$.

Tabela 1: Requisitos e ensaios de desempenho da ISO 12794 [9].

Nº	Característica de Desempenho	Requisito da ISO 12794	Tipo de Ensaio
1	Homogeneidade do Lote	O coeficiente de variação do valor avaliado para n monitores não deve exceder 15% para uma dose de 10 mSv ou menor	TCQ
2	Reprodutibilidade	O coeficiente de variação do valor avaliado para n monitores não deve exceder 10% para cada monitor separadamente para uma dose de 10 mSv ou menor	TCQ
3	Linearidade	A resposta não deve variar por mais de 10% quando os monitores são irradiados por equivalentes de dose na faixa de 1 mSv a 1 Sv	TT
4	Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas com Armazenamento por:	Os valores avaliados dos monitores irradiados tanto no início ou no final do período de armazenamento não devem diferir do valor verdadeiro convencional em mais de:	
4.1	30 Dias em Condições Padrão de Ensaio	5% ; ou seja, razão entre 0,95 e 1,05	TT
4.2	48 Horas: Umidade $\geq 90\%$ e Temperatura = $40^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$	10% ; ou seja, razão entre 0,90 e 1,10	TT
5	Limite Inferior de Detecção	O limite inferior de detecção não deve exceder um equivalente de dose de 1 mSv	TT
6	Auto Irradiação	Após um período de armazenamento de 60 dias, a dose zero não deve exceder 2 mSv	TT
7	Sinal Residual	Depois de uma irradiação com um valor verdadeiro convencional de 100 mSv:	
7.1	Efeito no Limite Inferior de Detecção	A dose zero não deve se alterar por mais de 1 mSv	TT
7.2	Efeito na Resposta	A resposta destes mesmos monitores deve permanecer dentro do requisito (10%) para a “Linearidade” para uma dose em torno de 2 mSv	TT
8	Efeito da Luz sobre o Monitor	Quando monitores são expostos à iluminação equivalente (295 nm a 769 nm) à luz solar de 1000 W.m^{-2} (em relação a de monitores mantidos no escuro) e irradiados no início ou no final do período de armazenamento:	
8.1	Efeito da Luz na Dose Zero	Após exposição à luz por 24 h, a dose zero não deve se alterar por mais do que 1 mSv	TT
8.2	Efeito da Luz na Resposta	Após exposição à luz por 1 semana, o valor avaliado em relação ao de monitores mantidos no escuro não deve diferir em mais de 10%	TT
9	Dependência Angular	Quando irradiado com fótons de $60 \pm 5 \text{ keV}$, o valor médio da resposta em ângulos de incidência de 0° , 20° , 40° e 60° não deve diferir em mais de 15% da resposta na incidência normal	TT
10	Dependência Energética a Fótons	Quando irradiado com fótons na faixa de energia de 15 keV a 3 MeV, a resposta não deve variar por mais de 50%	TT
11	Dependência Energética a Radiação Beta	Quando irradiado com radiação beta na faixa de energia ($E_{\text{máx}}$) de 0,5 MeV a 3 MeV, a resposta não deve variar por mais de 50%	TT

a) LID – limite inferior de detecção

b) Obs.: Em **negrito** está grafado o critério de aceite do requisito

Os diversos ensaios são classificados em ensaios de tipo (TT) e ensaios de controle de qualidade (TCQ). O TT tem por finalidade determinar se as características físicas e dosimétricas do projeto do sistema satisfazem determinados requisitos. Os TT devem ser realizados antes da implantação de um sistema de monitoração individual. Eles deverão ser repetidos, na sua totalidade ou em parte, se algo no sistema for modificado em sua essência, como por exemplo, o projeto do monitor, o tipo de detector, o tipo do leitor, o tipo de preparo do detector, o algoritmo de cálculo, etc... [10].

Os TCQ são ensaios que devem ser realizados não apenas quando da implantação do sistema; mas, também, periodicamente, para demonstrar que o sistema dosimétrico continua atendendo os critérios de aceitação estabelecidos. O TCQ testa as características que não são intrínsecas ao projeto do sistema de monitoração individual, por exemplo, a influência da adição de um novo lote de TLDs do mesmo tipo.

3. O SERVIÇO DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL DE EXTREMIDADE DO IRD

O IRD, desde 1972, opera um serviço de monitoração individual de extremidades com anéis dosimétricos, empregando a técnica de dosimetria termoluminescente [11]. Inicialmente, um anel reutilizável empregava dois tipos de detector termoluminescente (TLD) na forma física de pó encapsulado em vidro. Atualmente, é empregado na rotina mensal um anel plástico descartável, calibrado na grandeza equivalente de dose pessoal – $H_p(0,07)$, onde no seu interior está alojado um TLD [11]. Este anel apresenta algumas limitações de uso em ambientes úmidos e quando utilizados sob luvas emborrachadas ou plásticas porque podem ser danificados. Adicionalmente, por não apresentarem estanqueidade a líquidos não podem ser esterilizados quimicamente, o que também limita o seu emprego em alguns ambientes hospitalares. Este monitor ainda não foi totalmente estudado considerando a norma ISO 12794.

Em 2001, foi desenvolvido outro anel plástico descartável, tendo também como detector um TLD. Este anel possui um sistema de selagem que permite a esterilização. Estudos realizados demonstraram que o novo anel esterilizável foi aprovado em todos os ensaios de caracterização definidos na norma ISO 12794 [9,12].

4. PROPOSTA DE REQUISITOS DE DESEMPENHO

A proposta de regulamento técnico brasileiro que definirá os requisitos e ensaios para sistemas de monitoração individual de extremidade (anel/pulseira) para fótons, com TLDs deverá conter todos os ensaios descritos na norma ISO 12794 [9], com exceção do ensaio de dependência energética para radiação beta. Contudo, propõe-se algumas modificações e flexibilizações de critérios em alguns ensaios e a inclusão de um ensaio de resistência a impactos.

A flexibilização proposta tem o objetivo de facilitar aceitação e o emprego por parte dos Laboratórios uma vez que a exequibilidade de alguns critérios não é totalmente comprovada. Existem poucos relatos na literatura especializada sobre a aplicação da norma ISO 12794. Os

resultados obtidos com o emprego dos critérios flexibilizados constituirão importante informação a ser considerada durante uma futura revisão do regulamento proposto.

Os requisitos dos ensaios propostos são apresentados resumidamente na Tabela 2, considerando um nível de confiança de 95%. A principal modificação é a recomendação de que os requisitos relacionados com o limite inferior de detecção ou com o valor inferior da faixa de dose de um determinado ensaio tenham como critério de aceitação o valor do nível de registro (NR) adotado no Brasil para a monitoração de corpo inteiro (0,20 mSv). [13]. Os laboratórios brasileiros prestadores do serviço de monitoração individual de extremidade têm usado este valor. Ele é bastante inferior ao adotado pela norma da ISO (1 mSv) e, portanto, mais rigoroso mas, facilmente alcançável devido o estado-da-arte ao dosimetria no país.

As modificações nos ensaios desta proposta em relação à ISO 12794 são:

A. Linearidade:

Propõe-se o mesmo ensaio, mas iniciando a faixa de dose no valor do NR para corpo inteiro e não no valor fixo de 1 mSv.

B. Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas:

Como no ensaio de “Reprodutibilidade” é tolerável um limite de 10% no coeficiente de variação de cada monitor ensaiado, os autores consideram que 10% deve ser o valor mínimo para o critério de aceitação de qualquer outro requisito de desempenho!

B.1. Armazenamento por 30 Dias em Condições Padrão de Ensaio:

Desta forma é proposto que o limite de aceitação seja aumentado de 5% para 10%.

B.2. Armazenamento por 48 h na Temperatura em torno de 40°C e com Umidade de no mínimo 90%:

É proposto também que seja aumentado de 10% para 20%, considerando que está se submetendo o monitor a uma condição ambiental rigorosa.

C. Limite Inferior de Detecção (LID):

Da mesma forma que para o ensaio de linearidade, propõe-se que o ensaio seja feito para o valor do NR para corpo inteiro adotado no Brasil e não para o valor fixo de 1 mSv.

D. Auto Irradiação:

É proposto também a adoção do nível de registro como dose zero, após 60 dias de armazenagem, ao invés do valor de 2 mSv.

E. Efeito da Luz na Dose Zero:

Para este ensaio também é proposto que, após exposição à luz por 24 h, a dose zero não deve se alterar por mais do que o valor do nível de registro, e não o valor fixo de 1 mSv.

F. Dependência Angular a Fótons:

Para facilitar as irradiações (que são a maior dificuldade nas caracterizações de sistemas dosimétricos), propõe-se que o ensaio de dependência angular possa ser feito em qualquer feixe de raios X

com energia efetiva próxima a 60 keV, e que o limite de aceitação suba de 15% para 20%.

G. Resistência a Impactos:

É proposta adicionalmente a inclusão deste ensaio para harmonizar com as outras regulamentações técnicas existentes [14].

Tabela 2: Proposta dos requisitos dos ensaios de desempenho para a técnica TLD-extremidade.

Nº	Característica de Desempenho	Requisito de Desempenho	Tipo de Ensaio
1	Homogeneidade do Lote	O coeficiente de variação do valor avaliado para n monitores não deve exceder 15% para uma dose de 10 mSv ou menor	TCQ
2	Reprodutibilidade *	O coeficiente de variação do valor avaliado para n monitores não deve exceder 10% para cada monitor separadamente para uma dose de 10 mSv ou menor	TCQ
3	Linearidade	A resposta não deve variar por mais de 10% quando os monitores são irradiados por equivalentes de dose na faixa do NR a 1 Sv	TT
4	Estabilidade da Resposta sob Diversas Condições Climáticas com Armazenamento por:	Os valores avaliados dos monitores irradiados tanto no início ou no final do período de armazenamento não devem diferir do valor verdadeiro convencional em mais de:	
4.1	30 Dias em Condições Padrão de Ensaio	10% ; ou seja, razão entre 0,90 e 1,10	TT
4.2	48 Horas: Umidade $\geq 90\%$ e Temperatura = $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	20% ; ou seja, razão entre 0,80 e 1,20	TT
5	Limite Inferior de Detecção	O limite inferior de detecção não deve exceder ao NR	TT, TCQ
6	Auto Irradiação	Após um período de armazenamento de 60 dias, a dose zero não deve exceder ao NR	TT
7	Sinal Residual *	Depois de uma irradiação com um valor verdadeiro convencional de 100 mSv:	
7.1	Efeito no Limite Inferior de Detecção	O NR não deve ser excedido	TT
7.2	Efeito na Resposta	A resposta destes mesmos monitores deve permanecer dentro do requisito (10%) para a “Linearidade” para uma dose de 2 mSv	TT
8	Efeito da Luz sobre o Monitor	Quando monitores são expostos à iluminação equivalente (295 nm a 769 nm) à luz solar de 1000 W.m^{-2} (em relação aos monitores mantidos no escuro) e irradiados no início ou no final do período de armazenamento:	
8.1	Efeito da Luz na Dose Zero	Após exposição à luz por 24 h, a dose zero não deve se alterar para mais do que o NR	TT
8.2	Efeito da Luz na Resposta	Após exposição à luz por 1 semana, o valor avaliado em relação ao de monitores mantidos no escuro não deve diferir em mais de 10%	TT
9	Dependência Angular a Fótons	Quando irradiado com fótons de cerca de 60 keV, o valor médio da resposta em ângulos de incidência de 0° , 20° , 40° e 60° não deve diferir em mais de 20% da resposta na incidência normal	TT
10	Dependência Energética a Fótons	Quando irradiado com fótons na faixa de energia de 15 keV a 3 MeV, a resposta não deve variar por mais de 50%	TT
11	Resistência a Impactos	Ao deixar cair em queda livre, de uma altura de 1,5 m, em uma superfície rígida, 10 monitores devem resistir sem danos , em nenhuma de suas partes	TT, TCQ

a) NR - nível de registro adotado no Brasil

b) Obs.: Em **negrito** está grafado o critério de aceite do requisito

* - No caso de monitores descartáveis e reaproveitamento do TLD, o ensaio deve ser realizado posicionado o TLD em um novo monitor.

Posteriormente, os ensaios para “Dependência Energética a Radiação Beta” e para “Esterilização Química” poderão ser incluídos, para os casos onde estes forem necessários. Ao sistema de monitoração individual que atendesse a esses requisitos seria fornecida uma autorização adicional.

5. CONCLUSÃO

A proposta de requisitos de desempenho apresentada neste trabalho procura preencher uma lacuna na legislação que rege no país a autorização de funcionamento de

Laboratórios de monitoração individual externa de extremidades (anel/pulseira) para fótons, usando-se a técnica de dosimetria termoluminescente. Esta proposta considera que não é desejável sair de uma situação onde não existe qualquer regulamentação para outra em que os ensaios de desempenho tenham critérios de aceitação tão rigorosos que não possam ser atendidos pelo atual estado-da-arte ou por requisitos de desempenho inexequíveis.

Da mesma forma que para a monitoração individual de corpo inteiro para fótons, serão necessários regulamentos técnicos e administrativos adicionais que garantam a

rastreabilidade metrológica, a implantação de sistema de controle e garantia da qualidade e a transmissão dos dados para o Banco de Dados de Doses Ocupacionais Externa do IRD/CNEN.

REFERÊNCIAS

- [1] P. G. Cunha, *Modelo para Avaliação das Incertezas na Monitoração Individual para as Irradiações Externas a Fótons*, Tese de D.Sc. Rio de Janeiro, IBCCF/UFRJ, 1997.
- [2] Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, Norma CNEN-NN-3.01. Rio de Janeiro, CNEN, 2005.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Occupational Radiation Protection, Safety Guide* n° RS-G-1.1. Vienna, IAEA, 1999.
- [4] W. G. Alberts, *Active Neutron Personal Dosimetry- Concepts and Recent Approaches*, Rad. Prot. Dos., vol. 85(1-4), pp. 21-26, 1999.
- [5] International Atomic Energy Agency, *Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation*, Safety Guide n° RS-G-1.3. Vienna, IAEA, 1999.
- [6] M. M. Martins, *Desenvolvimento e Caracterização de um Sistema de Monitoração Individual de Nêutrons Tipo Albedo de Duas Componentes Usando Detectores Termoluminescentes*, Tese de D.Sc. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2008.
- [7] Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Resolução N° 07, de 21 de agosto de 1995*, Diário Oficial da União, Brasília, p. 13477-13481 de 01.09.1995. Seção I.
- [8] Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Portaria DRS N° 01, de 25 de agosto de 1995*, Diário Oficial da União, Brasília, p. 15526 de 04.10.1995. Seção I.
- [9] International Organization for Standardization, *Nuclear Energy – Radiation Protection – Individual Thermoluminescence Dosimeters for Extremities and Eyes*, ISO 12794, Geneva, 2000.
- [10] M. M. Martins, C. L. P. Maurício, W. W. Pereira, E. S. da Fonseca, A. X. Silva, “*Proposta de Requisitos de Desempenho no Brasil para Sistemas de Monitoração Individual Externa para Nêutrons Empregando a Técnica TLD-Albedo*”, Proceedings do V Congresso Brasileiro de Metrologia, artigo ID447.pdf, Salvador, Novembro 2009.
- [11] C. L. P. Maurício, M. M. Martins, E. V. Ramos, D. Souza-Santos, *A Brazilian Government External Individual Monitoring Service: Experience Since 1972*, Rad. Prot. Dos., vol. 144(1-4), pp. 130-136, 2011.
- [12] N. F. Meira, *Projeto e Caracterização de um Monitor Individual de Extremidade para Avaliação de Dose em $H_p(0,07)$* , Dissertação de M.Sc. Rio de Janeiro, IBRAG/UERJ, 2001.
- [13] Comissão Nacional de Energia Nuclear, *Restrição de*

Dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas, Posição Regulatória 3.01/004 ver. 01. Rio de Janeiro, CNEN, 2005.

- [14] Instituto de Radioproteção e Dosimetria, *Desempenho de Sistemas de Monitoração Individual – Critérios e Condições*, Regulamento Técnico IRD-RT n° 002.01/95. Rio de Janeiro, IRD, 1995.