



## Teste de tipo de um sistema de dosimetria TL para monitoração individual de fótons em $H_p(10)$

M. S. Ferreira; E. R. da Silva; C. L. P. Maurício

*Instituto de Radioproteção e Dosimetria/CNEN, CEP 22783-127, Barra da Tijuca - Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

*max.das.ferreira@gmail.com, everton@ird.gov.br, claudia@ird.gov.br*

---

### RESUMO

Apesar de regulamentado, o uso do  $H_p(10)$  para a estimativa da dose efetiva de fótons ainda não foi implementado no Brasil. A grandeza operacional utilizada no país, de forma transitória, é a dose individual ( $H_x$ ). Para a monitoração externa de indivíduos expostos a fótons, o IRD utiliza um sistema de dosimetria TL automático com monitores individuais do tipo MTS-N, da fabricante RADOS, que contém TLD de LiF:Mg,Ti. O objetivo deste trabalho foi caracterizar este sistema para avaliação da grandeza operacional  $H_p(10)$ . A faixa de medição é de 0,2 mSv a 2 Sv, para energias de fótons de 20 keV a 1250 keV. Os testes de tipo foram realizados através de ensaios de desempenho para as seguintes características: homogeneidade dos monitores, reprodutibilidade do sistema, linearidade, efeito de temperatura e umidade, desvanecimento e dependência energética e angular. Os requisitos de aceitação usados foram extraídos da norma IEC 62387 e do regulamento técnico IRD-RT 002.01/95. Os resultados obtidos comprovam que todos os requisitos foram atendidos, exceto para a qualidade N-25, no ângulo de 60°.

*Palavras-chave: monitoração individual, fótons, teste de tipo, TLD,  $H_p(10)$ .*

---

---

**ABSTRACT**

Although regulated, the use of  $H_P(10)$  to estimate the effective dose of photons has not yet been implemented in Brazil. The operational quantity used in the country, temporarily, is the photon dose equivalent ( $H_x$ ). For the external monitoring of individuals exposed to photons, the IRD uses an automatic TL dosimetry system with individual MTS-N monitors from the RADOS manufacturer, which contains LiF: Mg, Ti TLDs. The objective of this work was to characterize this system for the evaluation of the operational quantity  $H_P(10)$ . The measuring range is 0.2 mSv to 2 Sv, for photon energies from 20 keV to 1250 keV. The type test was done through performance tests for the following characteristics: homogeneity of the monitors, system reproducibility, linearity, temperature and humidity effect, energy and angular dependence, and fading. The acceptance requirements were taken from IEC 62387 standard and IRD-RT 002.01/95 technical regulation. The results show that all requirements have been met, except for the N-25 quality, at the angle of  $60^\circ$ .

*Keywords: individual monitoring, photon, type test, TLD,  $H_P(10)$ .*

---

## 1. INTRODUÇÃO

Como a monitoração individual externa é um dos requisitos de qualquer programa de proteção radiológica de instalações que realizam atividades utilizando a radiação ionizante, os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) devem utilizar monitores individuais capazes de estimar a dose efetiva recebida durante seu período de trabalho [1, 2]. A medição feita com estes monitores deve apresentar rastreabilidade e confiabilidade metrológica. O Serviço de Monitoração Individual Externa de fótons de corpo inteiro (SMIE), reconhecido pelas autoridades competentes do Brasil, é a instalação responsável pela avaliação das doses externas de fótons recebidas pelos IOE [3].

No Brasil, para a estimativa da dose efetiva de fótons, ainda é utilizada, transitoriamente, a grandeza operacional *photon dose equivalent*,  $H_x$ , denominada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) como dose individual [2, 5, 6]. As autorizações para um SMIE realizar a monitoração de corpo inteiro de indivíduos expostos a fótons são fornecidas para avaliações nesta grandeza [3]. Entretanto, a grandeza operacional definida internacionalmente para estimar a dose efetiva para qualquer tipo de radiação externa, é o equivalente de dose individual na profundidade de 10 mm,  $H_P(10)$  [4]. A CNEN e o Ministério da Saúde do Brasil, em seus regulamentos, já definiram a grandeza  $H_P(10)$  como a grandeza operacional a ser utilizada no país, porém adotaram, de forma transi-

tória, a grandeza  $H_x$  como a grandeza vigente até que o Brasil apresentasse condições metrológicas para migrar para o  $H_p(10)$ . A não utilização do  $H_p(10)$  para a estimativa da dose efetiva, no Brasil, gera diversos problemas como: dificuldades para realizar comparações de resultados obtidos no Brasil com aqueles obtidos em outros países; limitações na troca de informações científicas entre os laboratórios brasileiros e os internacionais; impossibilidade de um SMIE brasileiro participar de intercomparações internacionais com o sistema dosimétrico utilizado em sua rotina; a impossibilidade de acreditação de um SMIE brasileiro pelo INMETRO. Desta forma, é premente que o uso da grandeza  $H_p(10)$  seja implementado, o mais rapidamente possível, no Brasil. Para isso, além da adoção das medidas legais para a regulamentação do uso desta grandeza operacional, é essencial que os serviços de monitoração brasileiros adaptem seus sistemas dosimétricos para a avaliação das doses externas utilizando o  $H_p(10)$ , atendendo aos critérios nacionais e internacionais de desempenho predefinidos. O atendimento desses critérios pode ser verificado através dos resultados obtidos em ensaios de desempenho dos sistemas dosimétricos, considerando as grandezas de influência.

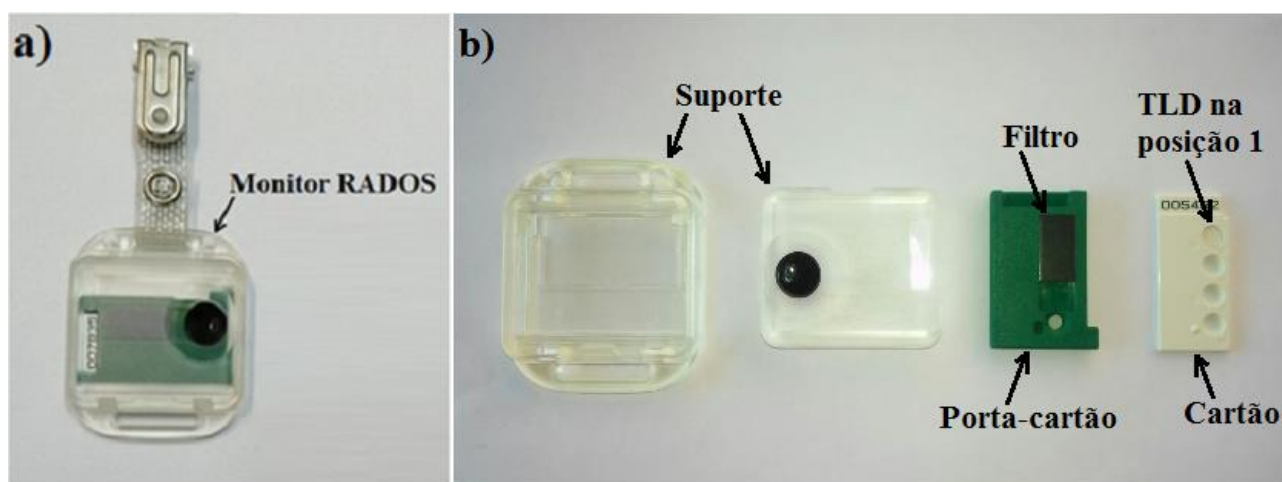
O SMIE do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) presta o serviço de monitoração individual externa, utilizando um sistema de dosimetria termoluminescente (TL) para avaliação de dose externa de fótons de corpo inteiro com monitores individuais do tipo MTS-N, da fabricante RADOS. Este sistema ainda avalia doses utilizando a grandeza  $H_x$ , porém está em fase de transição para poder avaliar doses através da grandeza  $H_p(10)$ . Assim, o objetivo deste estudo foi a realização de testes de tipo do sistema dosimétrico do IRD, utilizado para a avaliação da grandeza  $H_p(10)$ , através de ensaios de desempenho, com fótons de energia entre 20 keV e 1250 keV, na faixa de 0,2 mSv a 2 Sv. Os requisitos avaliados para cada ensaio foram os estabelecidos na norma internacional IEC 62387 [7] e no regulamento técnico IRD-RT 002.01/95 [8].

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL

A Figura 1a) apresenta o monitor individual da RADOS utilizado neste estudo. Ele é composto por um suporte plástico transparente com um porta-cartão e cartão contendo um TLD (detector termoluminescente), como detalhado na Figura 1b). O detector utilizado é um cristal termoluminescente do tipo LiF:Mg,Ti com 4,5 mm de diâmetro e 0,9 mm de espessura, colocado na posição 1 do

cartão. Este cartão, com código de barra para sua identificação unívoca, é inserido no porta-cartão, que possui um filtro de 1 mm de alumínio cobrindo a posição onde é inserido o TLD.

**Figura 1:** a) Monitor RADOS fechado; b) Monitor RADOS aberto, detalhando seus componentes.



Na rotina do SMIE do IRD, antes do início das avaliações das doses de usuários, um controle de qualidade diário é realizado, com cinco TLD irradiados com uma dose conhecida, por uma fonte de  $^{90}\text{Sr}$ , encapsulada no irradiador da fabricante RADOS, modelo RA-2000. A média das leituras destes TLD não pode ultrapassar 5% do valor de referência pré-definido. Todas as avaliações dos monitores são feitas no leitor TL automático, modelo RE 2000 da RADOS. A leitura é realizada aquecendo-se os TLD em gás nitrogênio a  $300^{\circ}\text{C}$ . Antes da leitura, é realizado um tratamento térmico, no próprio leitor, com temperatura constante de  $150^{\circ}\text{C}$  por 13,5 segundos, com o objetivo de eliminar sinais TL que são mais instáveis a temperatura ambiente.

A dose em  $H_P(10)$  é calculada através da equação 1.

$$H_P(10) = (L - \bar{L}_{Bg}) \times FC \quad (1)$$

Em que:

$L$  é a contagem do TLD do monitor avaliado;

$\bar{L}_{Bg}$  é a média da contagem do TLD do monitor de controle (não irradiado);

$FC$  é o fator de calibração.

Para a calibração do sistema, foram irradiados 5 monitores em um campo padronizado de  $^{137}\text{Cs}$ , com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), a 1,5 metros da fonte, no ângulo de  $0^\circ$ , seguindo a metodologia descrita na norma ISO 4037-3 [9]. Outro grupo de 5 monitores, não irradiado, foi usado para determinar o valor da radiação de fundo. Todos os monitores foram lidos após 1 mês da irradiação e o  $FC$  foi calculado através da equação 2:

$$FC = C_{ref} / (\bar{L} - \bar{L}_{Bg}) \quad (2)$$

Em que:

$C_{ref}$  é o valor de referência da grandeza  $H_P(10)$ ;

$\bar{L}$  é a média das leituras dos TLD irradiados;

$\bar{L}_{Bg}$  é a média das leituras dos TLD de controle.

### 3. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os monitores utilizados nos ensaios são compostos por TLD pertencentes a um mesmo lote, cujas respostas apresentam coeficiente de variação percentual inferior a 3,7%. A menos que indicado na descrição dos ensaios, as condições de irradiação e armazenamento são as descritas na Tabela 1. Todas as irradiações foram realizadas seguindo a norma ISO 4037-3 [9] e os requisitos de aceitação dos ensaios são aqueles definidos na norma internacional IEC 62387 [7] ou no regulamento técnico do IRD 002.01/95 [8], dependendo do ensaio. A incerteza expandida dos valores de referência das doses de irradiação é de 6%. Todas as incertezas foram calculadas com 95% de grau de confiança.

**Tabela 1:** Condições de referência para irradiação e armazenamento.

Parâmetros	Grandeza	Condições de referência
<b>Parâmetros para irradiação</b>	Dose de referência	2 mSv a $0^\circ$
	Energia de referência para fótons	662 keV ( $^{137}\text{Cs}$ )
	Distância fonte/monitor	150 cm
	Camada de <i>build up</i>	2 mm PMMA ( $^{137}\text{Cs}$ )
<b>Parâmetros para armazenamento</b>	Temperatura ambiente	de $15^\circ\text{C}$ até $25^\circ\text{C}$
	Umidade relativa	de 50% até 75%
	Período	30 dias
	Radiação gama de fundo	$< 0,20 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$
	Intensidade de luz	$1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

### 3.1. Homogeneidade do lote

O ensaio foi realizado com 60 monitores RADOS, irradiados nas condições de referência descritas na Tabela 1. Cada monitor ( $G_i$ ) foi avaliado e a conformidade estabelecida pelo requisito da equação 3 foi verificada [8].

$$(G_{max} - G_{min})/G_{max} \leq 0,3 \quad (3)$$

Em que:

$G_{max}$  é o maior valor da dose avaliada;

$G_{min}$  é o menor valor de dose avaliada.

### 3.2. Reprodutibilidade

Um grupo de 12 monitores RADOS foi preparado, irradiado com a dose de 10 mSv, e avaliado 10 vezes, mantendo sempre as mesmas condições de referência. Para cada irradiação  $i$ , foi calculada a média das doses avaliadas pelos 12 monitores ( $\bar{G}_i$ ) e o desvio padrão  $s_i$ . A equação 4 apresenta os critérios de aceitação para o desvio padrão das doses avaliadas para as 10 irradiações, considerando o seu intervalo de confiança, normalizado pela média dos  $\bar{G}_i$  (para  $i = 1$  a 10) [8].

$$\frac{s_i + I_i}{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \bar{G}_i} \leq 0,075 \quad (4)$$

Em que:

$s_i$  é o desvio padrão das doses avaliadas pelos 12 monitores para cada irradiação  $i$ ;

$\bar{G}_i$  é a média das doses avaliadas pelos 12 monitores para cada irradiação  $i$ ;

$I_i$  é o intervalo de confiança de  $s_i$ , calculado como  $t_{n,95\%} \cdot \sqrt{\frac{0,5}{n-1}} \cdot s_i = 2,20 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{11}} \cdot s_i$ .

Para cada monitor  $j$ , foi calculada a média das suas doses avaliadas nas 10 irradiações,  $\bar{G}_j$ , e o desvio padrão  $s_j$ . A equação 5 apresenta os critérios de aceitação para o desvio padrão das 12 doses avaliadas por cada monitor, considerando o seu intervalo de confiança, normalizado pela média  $\bar{A}_j$  (para  $j = 1$  a 12) [8].

$$\frac{s_j + I_j}{\bar{G}_j} \leq 0,075 \quad (5)$$

Em que:

$s_j$  é o desvio padrão das 10 doses avaliadas pelo monitor  $j$ ;

$\bar{G}_j$  é a média de todas as 10 doses avaliadas pelo mesmo monitor  $j$ ;

$I_j$  é o intervalo de confiança de  $s_j$ , calculado como  $t_{n,95\%} \cdot \sqrt{\frac{0,5}{n-1}} \cdot s_j = 2,26 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{9}} \cdot s_j$

### 3.3. Linearidade

Para o ensaio de linearidade, foram formados 13 grupos, contendo 5 monitores cada. Destes grupos, 1 foi usado para avaliação da radiação de fundo e 12 foram irradiados na faixa usada para a autorização dos SMIE no Brasil para doses de fótons de corpo inteiro: de 0,2 mSv a 2000 mSv [7].

Para cada grupo  $i$ , o critério de aceitação é dado pela equação 6.

$$0,91 - I_C \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \cdot \frac{C_{Ref}}{C_i} \leq I_C + 1,11 \quad (6)$$

Em que:

$\bar{G}_i$  é a média das doses avaliadas pelos monitores de cada grupo  $i$ ;

$C_i$  é o valor de referência da dose utilizada para irradiar cada grupo  $i$ ;

**Ref** é o grupo de referência ( $i = 4$ ), irradiado com a dose de referência de 2 mSv;

$I_{com}$  representa a incerteza expandida relativa de  $\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}}$  para 95% de grau de confiança;

$I_C$  é a incerteza combinada relativa da razão  $\frac{C_{Ref}}{C_i}$  para cada grupo  $i$ .

Como, para 95% de grau de confiança, as incertezas expandidas relativas dos valores de referência das irradiações foram de 6%, o valor de  $I_c$  calculado é de 0,085, para todos os grupos. Então, os limites de aceitação passam a ser de 0,83 (inferior) e 1,19 (superior), ao invés de 0,91 e 1,11.

### 3.4. Estabilidade em diferentes condições climáticas

Para o ensaio de estabilidade em diferentes condições de temperatura e umidade, foram formados 3 grupos com 12 monitores cada, em que 2 monitores de cada grupo são usados para controle da radiação de fundo. Após as irradiações, os grupos foram armazenados por uma semana, mantendo as seguintes condições [7]:

Grupo 1 – Condições de referência (Tabela 1);

Grupo 2 – Em baixa temperatura (12°C) e sem controle de umidade;

Grupo 3 – Em altas temperaturas (média de 41,7°C) e umidade elevada (aproximadamente 90%). Para reproduzir as condições supracitadas, o Grupo 2 foi armazenado em uma geladeira e o Grupo 3 em uma câmara climática. Após 1 semana, os grupos foram retirados dos locais em que estavam armazenados e foram guardados juntos por mais 24 horas em condições de referência (Tabela 1). Os monitores foram avaliados e para cada grupo  $i$ , o critério de aceitação é dado pela equação 7, sendo  $I_{com}$  calculado como definido na equação 6.

$$0,83 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,25 \quad (7)$$

### 3.5. Desvanecimento

Para o ensaio de desvanecimento, foram formados 3 grupos com 12 monitores cada, sendo que 2 de cada grupo foram usados como monitores de controle da radiação de fundo. Após as irradiações, cada grupo foi armazenado em condições padrão, conforme os períodos [7]:

Grupo 1 – 1 dia;

Grupo 2 – 30 dias;

Grupo 3 – 90 dias.



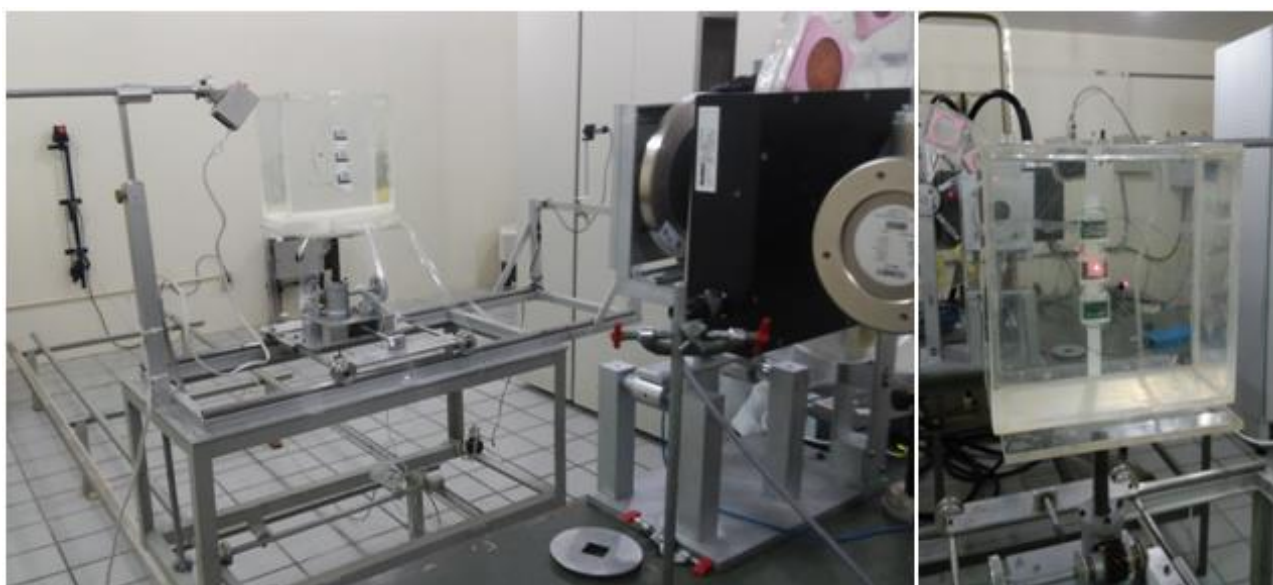
Para cada grupo  $i$ , o critério de aceitação é dado pela equação 8.

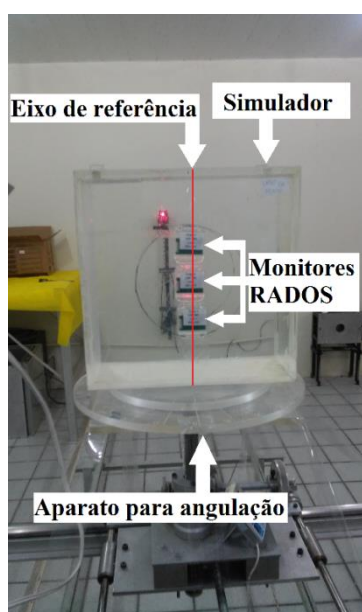
$$0,91 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,11 \quad (8)$$

### 3.6. Dependência energética e angular

As irradiações para os ensaios de dependência energética e angular foram realizadas no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE), seguindo também a metodologia descrita na norma ISO 4037-3 [9]. Foram utilizadas as seguintes qualidades de radiação de referência ISO:  $^{137}\text{Cs}$ , N-25, N-40, N-60, N-80, N-100 e  $^{60}\text{Co}$ . Os monitores foram irradiados nos ângulos de  $0^\circ$ ,  $40^\circ$  e  $60^\circ$ , exceto para o  $^{60}\text{Co}$ , em que foram irradiados apenas a  $0^\circ$  [7]. Para cada qualidade da radiação combinada a um ângulo de incidência, foram irradiados 3 monitores, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3. Para as irradiações em ângulo, os monitores foram posicionados na linha média vertical da face frontal do simulador de tronco da ISO e o simulador foi girado com um aparato rotacional, mantendo o eixo de referência, conforme mostra a Figura 4.

**Figura 2:** Irradiações em raios X



**Figura 3:** Irradiações com o irradiador de fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ **Figura 2:** Irradiações usando o aparato para a angulação

Para cada grupo  $i$ , o critério de aceitação é dado pela equação 9. Os valores de  $r_{min}$  e  $r_{max}$ , definidos, respectivamente, como os limites inferior e superior do critério de aceitação, para cada qualidade da radiação, de acordo com a norma IEC 62387 [7], estão na Tabela 2.

$$r_{min} - I_C \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \cdot \frac{C_{Ref}}{C_i} \leq I_C + r_{max} \quad (9)$$

**Tabela 2:** Limites do critério de aceitação para dependência energética e angular [7].

Qualidade da radiação	Limites do critério			
	$r_{min}$	$r_{max}$	$r_{min} - I_C$	$r_{max} + I_C$
S-Cs	0,71	1,67	0,63	1,75
S-Co	0,71	1,67	0,63	1,75
N-100	0,71	1,67	0,63	1,75
N-80	0,71	1,67	0,63	1,75
N-60	0,69	1,82	0,61	1,90
N-40	0,69	1,82	0,61	1,90
N-25	0,67	2,00	0,59	2,08

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Homogeneidade

Os valores avaliados no ensaio de homogeneidade variaram entre 1,8 mSv e 2,2 mSv, dando um resultado de 0,22 para a equação 6, sendo menor que 0,3, que é o limite de aceitação. O sistema foi aprovado para homogeneidade.

### 4.2. Reprodutibilidade

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados do ensaio de desempenho de reprodutibilidade do sistema.

**Tabela 3:** Resultados do ensaio de reprodutibilidade para cada irradiação dos 12 monitores.

Irradiação	$\bar{G}_i$ (mSv)	$s_i$ (mSv)	$I_i$ (mSv)	$\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \bar{G}_i$	Critério	Resultado	Aprovação
1	11,35	0,27	0,25	11,39	$\frac{s_i + I_i}{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \bar{G}_i} \leq 0,075$	0,045	Aprovado
2	11,36	0,37	0,28			0,058	Aprovado
3	11,37	0,36	0,28			0,056	Aprovado
4	11,37	0,37	0,29			0,058	Aprovado
5	11,35	0,44	0,31			0,066	Aprovado
6	11,47	0,40	0,30			0,061	Aprovado
7	11,38	0,39	0,29			0,060	Aprovado
8	11,37	0,40	0,30			0,061	Aprovado
9	11,42	0,37	0,29			0,058	Aprovado
10	11,45	0,39	0,29			0,060	Aprovado

**Tabela 4:** Resultados do ensaio de reprodutibilidade para cada monitor nas 10 irradiações.

Monitor	$\bar{G}_i$ (mSv)	$s_i$ (mSv)	$I_i$ (mSv)	Critério	Resultado	Aprovação
1	11,55	0,21	0,25	$\frac{s_j + I_j}{\bar{G}_i} \leq 0,075$	0,040	Aprovado
2	12,13	0,17	0,22		0,032	Aprovado
3	11,14	0,27	0,28		0,046	Aprovado
4	11,22	0,19	0,23		0,037	Aprovado
5	11,17	0,21	0,25		0,038	Aprovado
6	11,13	0,19	0,23		0,038	Aprovado
7	11,47	0,24	0,26		0,043	Aprovado
8	11,58	0,19	0,23		0,036	Aprovado
9	11,16	0,38	0,33		0,064	Aprovado
10	11,28	0,41	0,34		0,066	Aprovado
11	11,61	0,19	0,24		0,037	Aprovado
12	11,27	0,26	0,27		0,047	Aprovado

### 4.3. Linearidade

Os resultados obtidos no ensaio de linearidade são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Resultados do ensaio de Linearidade.

Grupos	$C_i$ (mSv)	$\bar{G}_i$ (mSv)	$\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \cdot \frac{C_{Ref}}{C_i}$	0,91- $I_C$	1,11+ $I_C$	$I_{com}$	Resultados			
							Menor	Maior	Aprovação	
1	0,2	0,20	1,01	0,83	1,19	0,09	0,92	1,11	Aprovado	
2	0,4	0,39	0,99				0,03	0,96	1,02	Aprovado
3	0,8	0,79	0,99				0,06	0,93	1,05	Aprovado
4	2	2,00	1,00				0,01	0,99	1,01	Aprovado
5	4	4,13	1,03				0,01	1,02	1,04	Aprovado
6	8	8,21	1,03				0,04	0,99	1,06	Aprovado
7	20	20,5	1,02				0,02	1,00	1,04	Aprovado
8	40	39,8	1,00				0,01	0,98	1,01	Aprovado
9	80	80,0	1,00				0,03	0,97	1,03	Aprovado
10	200	197	0,98				0,03	0,96	1,01	Aprovado
11	400	402	1,01				0,03	0,98	1,03	Aprovado
12	2000	2165	1,08				0,02	1,06	1,10	Aprovado

#### 4.4. Estabilidade em diferentes condições climáticas

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de estabilidade em diferentes condições climáticas.

**Tabela 6:** Resultados do ensaio de estabilidade em diferentes condições climáticas.

Grupos	$\bar{G}_i$ (mSv)	$\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}}$	Critério	$I_{com}$	Resultados		
					Menor	Maior	Aprovação
1	2,11	1,04	$0,83 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,25$	0,03	1,01	1,07	Aprovado
2	2,03	1,00		0,02	0,98	1,02	Aprovado
3	1,97	0,97		0,02	0,95	0,99	Aprovado

#### 4.5. Desvanecimento

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de desvanecimento.

**Tabela 7:** Resultados do ensaio de desvanecimento.

Grupos	$\bar{G}_i$ (mSv)	$\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}}$	Critério	$I_{com}$	Resultados		
					Menor	Maior	Aprovação
1	2,18	1,08	$0,91 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,11$	0,03	1,05	1,11	Aprovado
2	2,02	1,00		0,03	0,97	1,03	Aprovado
3	1,89	0,94		0,03	0,91	0,96	Aprovado

#### 4.6. Dependência energética e angular

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados dos ensaios da dependência energética e angular.

**Tabela 8:** Resultados dos ensaios de dependência energética e angular para fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

$^{137}\text{Cs}$							
Ângulo	$\bar{G}_i$ (mSv)	$\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}}$	Critério	$I_{com}$	Resultados		
					Menor	Maior	Aprovação
0°	2,02	1,00	$0,63 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,75$	0,09	0,91	1,09	Aprovado
40°	1,98	0,98		0,08	0,90	1,06	Aprovado
60°	3,20	1,58		0,11	1,47	1,69	Aprovado
$^{60}\text{Co}$							
0°	1,87	0,92	$0,63 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,75$	0,07	0,85	1,00	Aprovado

Tabela 9: Resultados dos ensaios de dependência energética e angular para qualidades de raios X.

N-100							
Ângulo	$\bar{G}_g$ (mSv)	$\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}}$	Critério	$I_{com}$	Resultados		
					Menor	Maior	Aprovação
0°	1,94	0,96	$0,63 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,75$	0,14	0,82	1,10	Aprovado
40°	1,94	0,96		0,11	0,84	1,07	Aprovado
60°	1,83	0,91		0,42	0,74	1,07	Aprovado
N-80							
0°	2,16	1,07	$0,63 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,75$	0,08	0,98	1,15	Aprovado
40°	2,16	1,07		0,17	0,89	1,24	Aprovado
60°	2,03	1,00		0,31	0,70	1,31	Aprovado
N-60							
0°	2,52	1,24	$0,61 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,90$	0,12	1,12	1,37	Aprovado
40°	2,49	1,23		0,17	1,06	1,40	Aprovado
60°	2,17	1,08		0,28	0,80	1,35	Aprovado
N-40							
0°	2,73	1,35	$0,61 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 1,90$	0,15	1,20	1,50	Aprovado
40°	2,63	1,30		0,18	1,12	1,48	Aprovado
60°	2,29	1,13		0,24	0,89	1,38	Aprovado
N-25							
0°	2,07	1,03	$0,59 \leq \left( \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{Ref}} \pm I_{com} \right) \leq 2,08$	0,09	0,93	1,12	Aprovado
40°	1,83	0,90		0,08	0,83	0,98	Aprovado
60°	1,11	0,55		0,12	0,43	0,67	Reprovado

## 5. CONCLUSÃO

O sistema de dosimetria TL implantado no IRD, utilizando monitores RADOS com um único TLD de LiF:Mg,Ti, sob um filtro de Al de 1 mm, atende aos requisitos de desempenhos testados para energias maiores que 30 keV e inferiores a 1250 keV, com ângulos de incidência da radiação entre 0 e 60° e doses de 0,2 mSv a 2 Sv. Assim, o desempenho global do sistema pode ser considerado adequado para o uso em monitoração individual externa de corpo inteiro para fótons na grandeza  $H_P(10)$ . Esse sistema atende aos requisitos internacionais de homogeneidade, reprodutibilidade, linearidade e desvanecimento, com resposta similar para temperaturas entre 12°C e 40°C e umidades de até 90%. O limite inferior de detecção deste sistema é inferior ao nível de registro mensal no Brasil, que é de 0,20 mSv. Para fótons com energias inferiores a 30 keV, o requisito de depen-

dência energética e angular não foi atendido para o ângulo de 60°. Para confirmar este resultado, é recomendável refazer o teste com um número maior de monitores para melhorar a estatística.

Deve-se ressaltar que todos os resultados das medições realizadas neste estudo devem contribuir para um melhor entendimento de outros sistemas dosimétricos, indicando pontos de possível melhoria e permitindo a identificação de suas limitações.

## 6. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN) e ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE) pela infraestrutura e suporte oferecido para execução deste trabalho. O primeiro autor também agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado recebida.

## REFERÊNCIAS

- [1] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. CNEN NN 3.01**, 2011.
- [2] Brasil. Portaria SVS/MS nº 453 (1998). **Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico. Portaria SVS/MS nº 453, de 1 de junho de 1998**. Secretária de Vigilância Sanitária Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo. Disponível em: <[http://www.conter.gov.br/uploads/legislativo/portaria\\_453.pdf](http://www.conter.gov.br/uploads/legislativo/portaria_453.pdf)>. Acesso em 30 de Jan. 2018.
- [3] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Sistemática para Certificação de Serviços de Monitoração Individual Externa. Portaria DRS/CNEN No. 1 de 25/08/1995**, publicada no DOU Nº 191 de 04/10/1995, Brasil, 1995.
- [4] INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Sistema Internacional de Unidades. SI INMETRO/CICMA/SEPIN**, Duque de Caxias, RJ, 2012.
- [5] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica. Posição Regulatória 3.01/002**, CNEN, 2005.

- [6] CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Critérios para Cálculo de Dose Efetiva a partir da Monitoração Individual. Posição Regulatória 3.01/005**, CNEN, 2005.
- [7] IEC - International Electrotechnical Commission. **Radiation protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation. IEC 62387**, 1<sup>st</sup> ed., 2012.
- [8] IRD - Instituto de Radioproteção e Dosimetria. **Desempenho de sistemas de monitoração individual - Critérios e condições. IRD.RT N° 002.01/95**, 1995.
- [9] ISO - International Organization for Standardization. **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**, 1<sup>st</sup> ed., 1999.