

Adelaide Benedita Armando Francisco

**REQUISITOS TÉCNICOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE SERVIÇO DE
MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA DE CORPO INTEIRO PARA FÓTONS
UTILIZANDO DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção da certificação de Especialista pelo Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva

Coorientador: M.Sc. Everton Rodrigues da Silva

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

2016

T
539.77
F818r

Francisco, Adelaide Benedita Armando
Requisitos técnicos para a implantação de um serviço de
monitoração individual para avaliação da grandeza $H_p(10)$ utilizando
dosimetria termoluminescente / Adelaide Benedita Armando Francisco /
Rio de Janeiro: IRD/IAEA, 2016.
XIII, 100 f.: il.; gr.; tab.; 29 cm.

Orientador: Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva
Co-orientador: M.Sc. Everton Rodrigues da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização (Lato Sensu) em
Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas) – Instituto de
Radioproteção e Dosimetria. 2016.

Referências bibliográficas: f. 91-94

1. Monitoração Individual
 2. Dosimetria Termoluminescente
 3. Equivalente de dose individual
 4. Curva Trombeta
 5. Ensaios de Caracterização e de Desempenho
- I. Título

Adelaide Benedita Armando Francisco

**REQUISITOS TÉCNICOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE SERVIÇO DE
MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA DE CORPO INTEIRO PARA FÓTONS
UTILIZANDO DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE**

Rio de Janeiro, 24 de Agosto de 2016.

Prof. Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva – IRD/CNEN

Prof. M.Sc. Everton Rodrigues da Silva – IRD/CNEN

Prof. Dr. Marcelo Marques Martins – IRD/CNEN

Prof. Dr. Marcus Alexandre Vallim de Alencar – IRD/CNEN

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob a orientação de Prof. Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva e coorientação do Prof. Everton Rodrigues da Silva.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por tudo que tem feito na minha vida.

Aos meus pais que não se encontram neste mundo, pela educação e incentivo aos estudos que me deram durante, e aos meus irmãos, por todo carinho e amor, e pela confiança que depositaram em mim na conclusão deste curso.

À Agência Internacional de Energia Atômica, por ter me concedido a bolsa de estudo a qual tornou possível a minha formação.

À Professor Doutor Alexandre Maria Maphossa, Diretor Geral da Agência Nacional de Energia Atômica, por ter me autorizado a frequentar o curso.

Este trabalho não seria possível sem a orientação segura, transmissão de conhecimentos, paciência, atenção, dedicação, incentivo dos professores Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva, meu orientador, e M. Sc. Everton Rodrigues da Silva, meus coorientador, para quem vai o meu muito obrigado!

À Professor Doutor Aucyone Augusto da Silva que incansavelmente deu seu apoio, carinho, zelo e disposição em atender todas as dificuldades enfrentadas para a minha estadia no Brasil e para a conclusão deste curso.

À Max da Silva Ferreira que contribuiu diretamente e incansavelmente nas pesquisas e elaboração deste trabalho, com as suas ideias e sugestões.

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear (IRD/CNEN), por ter aceitado a minha candidatura para frequentar o curso lecionado pelo seu rico corpo docente.

Aos membros do Laboratório de Dosimetria de Fótons (LDF) do IRD que disponibilizou os espaços do laboratório para a realização desta pesquisa.

Ao corpo docente da pós-graduação, pela sabedoria, respeito e profissionalismo em todos os instantes do curso.

A todos os professores, pesquisadores e funcionários do Curso de Pós-Graduação Lato Sensu do IRD.

Aos meus colegas de turma, Camila Neves, Luís Cavalcante, Marlon Silva, Mário Botelho, Edmar Machado, Wiclif Torroate, Fernando Fama, Fernando Duarte e Edson Junior, pelo carinho e atenção prestada durante o curso.

RESUMO

O presente trabalho visa estabelecer requisitos técnicos para desenvolvimento de um sistema de dosimetria termoluminescente (TL) para a avaliação da grandeza operacional $H_p(10)$, embasando a implantação de um serviço de monitoração individual externa (SMIE) em países que não o possui. Isso permite um maior conhecimento sobre a técnica, contribuindo na identificação dos critérios técnicos a serem seguidos por um laboratório de dosimetria e na avaliação do desempenho do sistema dosimétrico. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica baseada em literaturas específicas da área de dosimetria, e posteriormente, foram reproduzidos na prática, parte dos ensaios de caracterização e de desempenho que devem ser executados por um sistema dosimétrico. A partir de normas internacionais e do regulamento técnico adotado no Brasil, que descrevem esses ensaios para um sistema dosimétrico, foram definidos aqueles que são essenciais para a implantação de um novo sistema. Para verificar o desempenho de um sistema de dosimetria, foi realizada uma análise do desempenho dos SMIE Brasileiro no período de 2010 a 2015, utilizando a curva trombeta, onde se pôde verificar que a maior parte dos SMIE, foram aprovados com resultados excelentes. Os requisitos técnicos para desenvolvimento de um sistema de dosimetria termoluminescente garantem que o sistema forneça resultados tecnicamente confiáveis e permitem a demonstração do cumprimento dos critérios padrões estabelecidos por normas nacionais e internacionais, e com a implementação do sistema de dosimetria, é verificado o cumprimento dos limites de doses anuais estabelecidos para os indivíduos ocupacionalmente expostos.

Palavras chaves: Monitoração Individual. Dosimetria Termoluminescente. Equivalente de Dose Individual. Curva Trombeta. Ensaios de Caracterização e de Desempenho.

ABSTRACT

This work aims to establish technical requirements for the development of a TLDs system for the assessment of operational quantity $H_p(10)$, in order to implement an external individual monitoring service in countries who don't have. This allows a better understanding of the technics and the thermoluminescent dosimetry system, thus contributing to identify the technical criteria to be followed by a dosimetry laboratory and evaluation of the dosimetric system performance. For this, the review of the specific literature of the dosimetry field was conducted and later the type and performance tests that must be followed by a dosimetric system were reproduced in practice. In addition was made a analysis of international standards norms and the technical regulation used in Brazil, to define the essential type testes to a dosimetric system. To check the performance of a dosimetry system, a performance analysis of the Brazilian TLDs system was carried out over the past 6 years using the trumpet curve, where it was observed that most of TLDs system, in this review period, were approved and have excellent performance. The technical requirements for the development of a thermoluminescent dosimetry system ensure that the system provides technically reliable results and allow demonstration of compliance with the standard criteria established by national and international standards, and the implementation of the dosimetry system, is verified the compliance of the annual doses limits set for occupationally exposed.

Keywords: Individual Monitoring. Thermoluminescent dosimetry. Personal Dose Equivalent. Trumpet Curve. Performance and type Tests.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Organização do trabalho.....	4
2 FUNDAMENTOS EM MONITORAÇÃO INDIVIDUAL	5
2.1 Conceitos básicos da dosimetria de fótons.....	7
2.1.1 Grandezas físicas ou fundamentais.....	8
2.1.1 Grandezas limitantes ou de radioproteção.....	10
2.1.3 Grandezas operacionais.....	11
3 FUNDAMENTOS EM DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE E SISTEMA DOSIMÉTRICO DO LDF/IRD	14
3.1 Fundamentos em dosimetria termoluminescente.....	14
3.1.1 Descrição do fenômeno da termoluminescência.....	14
3.1.2 Termoluminescência aplicada à dosimetria.....	16
3.1.2.1 Reprodutibilidade do sistema TL.....	17
3.1.2.2 Linearidade da resposta do sistema TL.....	18
3.1.2.3 Dependência energética do sistema TL.....	18
3.1.2.4 Dependência angular do sistema TL.....	19
3.1.2.5 Desvanecimento do sinal TL (fading).....	19
3.1.2.6 Sensibilidade à luz do monitor individual.....	20
3.1.2.7 Limite inferior de detecção do sistema TL.....	20
3.1.2.8 Sinal residual do detector TL.....	20
3.1.2.9 Homogeneidade do lote do monitor individual.....	20
3.1.2.10 Características de alguns materiais TL comercializados.....	21
3.1.3 Instrumentação para dosimetria TL.....	21
3.1.3.1 Descrição.....	21
3.1.3.2 Detector TL.....	21
3.1.3.3. Monitor individual.....	22
3.1.3.4 Leitor TL.....	22
3.1.3.5 Fornos para tratamento térmico.....	24
3.1.3.6 Pinças para manipulação do detector TL.....	24
3.1.4 Aspectos operacionais da dosimetria TL.....	25

3.1.4.1	Descrição geral dos principais procedimentos técnicos.....	25
3.1.4.2	Avaliação do desempenho do SMIE.....	28
3.2	Sistema de dosimetria TL do SMIE do IRD para fótons de corpo inteiro.....	31
3.2.1	Procedimentos técnicos.....	32
3.2.1.1	Tratamentos térmicos.....	34
3.2.1.2	Formação de lotes de monitor individual.....	34
3.2.1.3	Calibração do sistema TL.....	34
3.2.1.4	Controle de qualidade dos monitores individuais usados na rotina.....	35
3.2.1.5	Avaliação de monitor individual e algoritmo de cálculo de dose.....	35
4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA	
	DOSIMÉTRICO.....	38
4.1	Ensaio descritos na norma padronizada internacional – IEC 61066.....	39
4.1.1	Não linearidade	39
4.1.2	Dependência energética e angular.....	40
4.1.3	Influência da temperatura ambiente e umidade relativa.....	41
4.1.4	Efeito da luz sobre o monitor individual.....	42
4.1.5	Influência de build up dose, desvanecimento, a auto-irradiação e de resposta à radiação natural sobre o monitor individual.....	43
4.1.6	Características de sobrecarga, efeitos posteriores e reutilização do monitor individual.....	44
4.1.7	Incidência do ângulo de irradiação sobre o monitor individual.....	46
4.1.8	Requisitos de desempenho mecânico.....	46
4.2	Ensaio descritos no regulamento técnico do IRD – IRD-RT No. 002.02/2010.....	48
4.2.1	Homogeneidade do lote.....	49
4.2.2	Reprodutibilidade.....	49
4.2.3	Linearidade.....	50
4.2.4	Limite inferior de detecção.....	50
4.2.5	Auto-irradiação.....	51
4.2.6	Estabilidade dos monitores individuais sob diferentes condições climáticas.....	51
4.2.7	Sinal residual.....	52
4.2.8	Efeito da luz sobre o monitor individual.....	53

4.2.9 Dependência energética.....	54
4.2.10 Dependência angular.....	54
4.2.11 Influência da presença de um simulador.....	55
4.2.12 Influência da irradiação pósterio-anterior.....	56
4.2.13 Resistência a impactos.....	56
5. METODOLOGIA.....	57
5.1 Requisitos técnicos para implantação de um serviço de monitoração individual.....	58
5.2 Ensaios de caracterização e de desempenho essenciais para um sistema de dosimetria.....	59
5.3 Análises de desempenho dos AMIEs do Brasil.....	59
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
6.1 Requisitos técnicos para implantação de um serviço de monitoração individual.....	61
6.2 Ensaios de caracterização e de desempenho essenciais para um sistema de dosimetria.....	67
6.3 Desempenhos de SMIEs brasileiros no período de 2010 a 2015.....	74
6.3.1 Curvas Trombetas de avaliação de desempenho dos onze SMIEs no período de 2010 a 2015	77
7. CONCLUSÃO.....	89
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características de alguns materiais TL comercializados.....	21
Tabela 2: Qualidade de radiações.....	40
Tabela 3: Energias e ângulos utilizados para a irradiação.....	40
Tabela 4: Procedimentos para atendimento às exigências do regulamento técnico de um SMIE.....	63
Tabela 5: Informações básicas dos Testes do sistema descritos em documentos de referência.....	68
Tabela 6: Ensaio de Caracterização e de Desempenho Essenciais para um Sistema de Dosimetria.....	72
Tabela 7: Classificação de onze SMIE do Brasil.....	74
Tabela 8: Desempenho de onze SMIE do Brasil.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre as grandezas dosimétricas.....	13
Figura 2: Modelo simplificado da termoluminescência.....	15
Figura 3: Exemplo de um pico de emissão TL.....	16
Figura 4: (a): Resposta do material TL; (b): Região linear do material TL em função da dose (LiF:Mg,Ti (TLD-100))	18
Figura 5: (a): Esquema básico do funcionamento do leitor; (b): Exemplo de leitor TL.....	23
Figura 6: Diagrama do uso de pinça a vácuo: (a) início da sucção do TLD, (b) movimentação do TLD preso na pinça a vácuo e (c) liberação do TLD....	24
Figura 7 Exemplo de uma curva trombeta plotada utilizando dados do desempenho mensal de SMIE 1, obtidos no programa de acompanhamento para de avaliação do desempenho dos SMIEs Brasileiro, realizado pelo CASEC.....	30
Figura 8: Vistas frontal, posterior e lateral do monitor.....	32
Figura 9: (a): Componentes do monitor individual de corpo inteiro; (b): Descrição das posições de inserção de cristais no cartão de TLD.....	32
Figura 10: Fluxo de procedimentos realizados antes dos monitores serem utilizados na rotina.....	33
Figura 11: Fluxo dos principais procedimentos realizados na rotina.....	33
Figura 12: Algoritmo para avaliação das doses dos monitores individuais.....	37
Figura 13: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2015.....	75
Figura 14: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2014.....	75

Figura 15: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2013.....	76
Figura 16: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2012.....	76
Figura 17: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2011.....	76
Figura 18: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no período de 2010.....	77
Figura 19: Resumo do desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no período de 2010 a 2015.....	77
Figura 20: Desempenho de SMIE 1 no período de 2010 a 2015.....	78
Figura 21: Desempenho de SMIE 2 no período de 2010 a 2015.....	79
Figura 22: Desempenho de SMIE 3 no período de 2010, 2014 e 2015.....	80
Figura 23: Desempenho de SMIE 4 no período de 2010 a 2015.....	81
Figura 24: Desempenho de SMIE 5 no período de 2010 a 2015.....	82
Figura 25: Desempenho de SMIE 6 no período de 2010 a 2015.....	83
Figura 26: Desempenho de SMIE 7 no período de 2010 a 2015.....	84
Figura 27: Desempenho de SMIE 8 no período de 2010 a 2015.....	85
Figura 28: Desempenho de SMIE 9 no período de 2010 a 2015.....	86
Figura 29: Desempenho de SMIE 10 no período de 2010 a 2015.....	87
Figura 30: Desempenho de SMIE 11 no período de 2010 a 2015.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS

Equivalente de dose individual – $H_p(10)$.

Dose individual - H_x .

Termoluminescente – TL.

Serviço de Monitoração Individual Externa – SMIE.

Indivíduos ocupacionalmente expostos – IOE.

Limite Inferior de Detecção – LID.

Limite superior de detecção – H_{sup} .

Média das leituras do grupo – \bar{E}_i .

Média de valor na condição de referência – $\bar{E}_{r,0}$.

Dose de referência – $C_{r,0}$.

Intervalo de confiança para 95% calculado de acordo com a equação A2 – U_m .

Intervalo de confiança para 95% calculado de acordo com a equação A2' – U_{com} .

Intervalo de confiança para 95%, calculado de acordo com a equação A2'' – $U_{C,com}$.

Média de valor no ângulo α_{max} – $\bar{E}_{\alpha_{max}}$.

1. INTRODUÇÃO

Para a realização de práticas que envolvem exposição a radiações ionizantes, os trabalhadores devem utilizar monitores individuais capazes de medir a dose recebida pelo indivíduo durante o período de monitoração (IAEA, 2014). Essa avaliação deve ser uma estimativa da dose efetiva recebida pelo trabalhador, perante um sistema dosimétrico que normalmente aplica uma das seguintes técnicas: dosimetria fotográfica, dosimetria termoluminescente (TL) ou dosimetria opticamente estimulada (OSL). A técnica de dosimetria fotográfica apesar de eficiente e apresentar vantagens, pode ser considerada obsoleta, pois além de normalmente necessitar de um processo de revelação dos filmes, as próprias emulsões fotográficas estão deixando de ser fabricadas (TAUHATA et al., 2014). A técnica de dosimetria OSL é a mais recente e possui características que a colocam na vanguarda da monitoração individual (MCKEEVER, 2001) Porém, a técnica de dosimetria TL ainda é a mais utilizada no Brasil, sendo bem estabelecida (IRD/CNEN, 2016).

O monitor individual utilizado para monitoração individual externa mede uma grandeza operacional que, seguindo critérios de exatidão bem estabelecidos, deve ser uma boa estimativa da grandeza limitante (dose efetiva ou dose equivalente). A principal grandeza operacional utilizada internacionalmente é o equivalente de dose individual, $H_p(10)$, para corpo inteiro, que é definida pela Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação (ICRU) e adotada pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) (VALENTIN, 2007). No Brasil, ainda é utilizada a grandeza operacional dose individual (H_x), em que o sistema dosimétrico é calibrado em kerma no ar e utiliza-se um fator de conversão para obter a dose individual registrada pelo monitor individual ($f = 1,14 \text{ Sv/Gy}$). Este fator é independente da energia da radiação e do ângulo de irradiação. Apesar de H_x ser uma boa estimativa da dose efetiva, já não está sendo mais utilizada pelos outros países, pois o $H_p(10)$ reflete melhor a dose recebida pelo usuário (CNEN, PR 3.01/002, 2011). Por esta razão, verifica-se a necessidade premente de realizar a transição da grandeza H_x para $H_p(10)$.

O sistema de dosimetria compreende procedimentos para medição, interpretação e registro de doses recebidas pelos trabalhadores, devendo

atender requisitos de exatidão, precisão e outros relacionados ao gerenciamento dos registros gerados na monitoração individual monitoração (IAEA, 2014). Para isso, um Serviço de Monitoração Individual Externa (SMIE) precisa atender plenamente critérios técnicos e administrativos estabelecidos pelas autoridades competentes e reconhecidas. Isso deve ser obtido mediante uma análise da adequação dos SMIEs aos regulamentos técnicos vigentes no País, que devem estar em conformidade com padrões internacionais (IRD-RT 001.02, 2010).

No Brasil, a monitoração individual externa abrange 164.739 trabalhadores, sendo realizada por onze SMIE aprovados pelo Comitê de Avaliação de Serviços de Ensaio e Calibração (CASEC) do IRD através das três técnicas dosimétricas supramencionadas (DA SILVA. CASEC IRD, 2016). O CASEC tem a competência oficial de verificar a conformidade dos requisitos técnicos dos SMIE, perante a avaliação constante do atendimento dos critérios técnicos e administrativos estabelecidos em seus regulamentos; análise de desempenho dos sistemas; e realização de auditorias nos laboratórios (IRD-RT 001.02, 2010).

Apesar de a monitoração individual estar bem estabelecida na comunidade internacional, com documentos e procedimentos padronizados, alguns países, como, por exemplo, Moçambique, não possuem um serviço de monitoração individual externa em operação, nem requisitos legais estabelecidos.

Em Moçambique, normas específicas de proteção radiológica e segurança nuclear ainda não foram aprovadas, sendo adotadas como referência os documentos da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). Nestes termos, os requisitos legais para a monitoração individual externa ainda não foram instituídos, nem há um SMIE em operação no país. Perante esta lacuna, a monitoração dos trabalhadores pode ser considerada deficiente, visto que nem todos os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) utilizam monitores individuais e aqueles que são monitorados, usam monitores individuais de SMIE estabelecidos em outros países, que seguem critérios de qualidade e de desempenho não controlados por entidade moçambicana. Assim, pode-se considerar relevante a contribuição científica e social de um

trabalho que vise estabelecer os fundamentos para definição de requisitos técnicos a serem atendidos para monitoração individual em países que ainda não possuem SMIE operacional, nem regulação bem estabelecida para essa atividade. Deverá ser considerado, no entanto, as peculiaridades de cada país, sobretudo a sua estrutura metrológica estabelecida, a realidade econômica e a demanda necessária.

Após a constituição e início das atividades de um SMIE, considera-se importante que no país exista um programa de acompanhamento, sob responsabilidade de um órgão competente, para verificação do desempenho do sistema utilizado pelo SMIE. Desta forma, seria possível a avaliação permanente do laboratório, especialmente do seu atendimento aos critérios de qualidade e dos requisitos de exatidão e de precisão exigidos. Para isso, o estudo dos métodos, ferramentas e resultados da experiência brasileira no acompanhamento oficial do desempenho de seus SMIEs, pode embasar os Países que ainda estão em fase de implantação de sistemas dosimétricos, a estabelecerem o seu próprio programa de acompanhamento (DA SILVA. CASEC IRD, 2016). Também, essa experiência pode fornecer subsídios para a definição dos critérios de aceitação e de avaliação dos resultados obtidos pelos laboratórios de monitoração individual.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estabelecer os requisitos técnicos para desenvolvimento de um sistema de dosimetria termoluminescente (TL) para a avaliação da grandeza operacional $H_p(10)$, embasando a implantação de um serviço de monitoração individual externa em países que não o possuem.

Apesar do Brasil ainda utilizar a grandeza dose individual, este trabalho terá como referência a grandeza $H_p(10)$, pois, conforme explicitado anteriormente, é a grandeza mais utilizada internacionalmente, enquanto o H_x está em progressivo desuso.

1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são apresentados:

- Descrever os critérios para a avaliação de doses de fótons utilizando a grandeza equivalente de dose individual - $H_p(10)$.

- Descrever e analisar os ensaios de caracterização e de desempenho do sistema dosimétrico a partir de Regulamento Técnico adotado pelo Brasil e Normas internacionais.

- Discutir os aspectos operacionais envolvidos na dosimetria TL em um serviço de monitoração individual externa, baseado nos regulamentos brasileiro e na experiência operacional do Laboratório de Dosimetria de Fótons do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (LDF/IRD).

- Analisar o desempenho dos sistemas dosimétricos implantados no Brasil, no período de 2010 a 2015, para estabelecer as bases metodológicas e de interpretação de resultados de um programa de acompanhamento de SMIEs.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho possui uma estruturação que contempla os fundamentos teóricos da monitoração individual externa para fótons, incluindo os conceitos básicos de dosimetria TL, relação dos ensaios de caracterização e de desempenho descritos nas Normas de padrões internacionais e no Regulamento Técnico vigente no Brasil, calibração de monitores individuais e avaliação da performance de SMIE Brasileiro. Outrossim, além da fundamentação supracitada, é apresentada a metodologia utilizada para a realização deste estudo, bem como os resultados obtidos e as conclusões que podem ser extraídas, destacando as potenciais contribuições acadêmicas, científicas e sociais para Países em que monitoração individual ainda é incipiente.

2. FUNDAMENTOS EM MONITORAÇÃO INDIVIDUAL

O uso da radiação ionizante proporciona inúmeros benefícios em várias áreas de sua aplicação, incluindo indústria, medicina, pesquisa científica, educação e agricultura. Porém, devido a possíveis efeitos prejudiciais na saúde e no meio ambiente causados pela exposição, torna-se necessário regulamentar o uso das radiações ionizantes para garantir um nível adequado de segurança radiológica na realização das práticas (IAEA, 2007). Assim, dentre outros requisitos, são estabelecidos limites de dose para os indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e membros do público, que não devem ser excedidos, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela autoridade reguladora. Para garantir o atendimento desses limites, deve ser implementado um programa de monitoração individual de doses, levando-se em conta a natureza e intensidade das exposições normais e potenciais previstas, com o objetivo de não só fornecer informações que demonstrem a conformidade dos limites de doses, mas também para dar suporte à justificação e otimização de uma prática (IAEA, 2014).

Segundo o padrão básico de segurança utilizado internacionalmente (IAEA, 2014), a monitoração individual é parte integrante de um programa de proteção radiológica, exigida por lei para todas as práticas sujeitas ao controle regulatório, contribuindo para aumento da capacidade de prevenir acidentes no trabalho, efeitos da radiação ionizante, e melhoria de condições de trabalho. Em relação à exposição externa, esta é realizada pelo monitor individual adequado a cada tipo de radiação e utilizado pelos IOEs, a fim de medir grandezas e parâmetros que permitam controlar ou avaliar a exposição (IAEA, 2014).

Os monitores devem ser utilizados dentro de um período legalmente estipulado (normalmente 1 mês), de forma que toda informação armazenada pelo monitor, desde o início de sua utilização, seja considerada na sua avaliação, e reflita a dose recebida pelos usuários em situações normais de trabalho e em casos de acidente. Normalmente, ao final de cada período de utilização do monitor individual, o trabalhador recebe um novo, e aquele já utilizado é encaminhado para a avaliação em um laboratório especializado, genericamente denominado de Serviço de Monitoração Individual Externa

(SMIE). Para a consistência do resultado obtido no monitor individual pessoal deve-se garantir a relação unívoca entre o monitor e usuário, ou seja, a dose registrada pelo monitor deve estar associada ao seu usuário de forma exclusiva (MAURICIO, 2001).

As radiações não são uniformemente distribuídas em todos os campos, e quanto mais complexo for a geometria do campo de radiação do IOE, maior será a diferença entre o valor encontrado no monitor com a provável dose efetiva correspondente ao campo. Por isso torna-se importante a relação numérica entre os dados da monitoração individual e a grandeza de proteção, de modo que os resultados sejam interpretados corretamente e os procedimentos de monitoração possam ser estabelecidos adequadamente, reduzindo assim o erro que pode estar associado a cada etapa da monitoração e a incerteza inerente ao sistema (IRD, 1998; GARCIA et al, 2009).

O sistema de monitoração individual envolve a quantificação do sinal registrado por um monitor individual pessoal, que deve ser relacionado a uma grandeza dosimétrica, e servirá de referência para verificação do atendimento aos limites legais de dose. Este processo envolve vários procedimentos técnicos que incluem as seguintes etapas (IRD, 1998; GARCIA et al, 2009):

- Escolha de um sistema metroológico (grandezas de proteção, operacional e de calibração);
- Tipo do monitor individual (detector, filtros, desempenho e aspectos geométricos);
- Sistema de calibração (rastreadibilidade, algoritmo) e garantia de qualidade (capacidade de reproduzir resultado);
- Definição da geometria de medição (número de monitores, sua posição sobre o corpo, ângulo de incidência mais relevante etc.);
- Avaliação dos monitores individuais;
- Sistema de registro das doses e de gerenciamento da documentação associada aos procedimentos;
- Interpretação dos resultados.

A avaliação das doses externas, normalmente é realizada através de um sistema de dosimetria individual que utiliza uma das seguintes técnicas dosimétricas (IRD-RT 002.02, 2010):

- dosimetria fotográfica: técnicas que utilizam a propriedade de filmes fotográficos de escurecerem ao interagir com a radiação ionizante, de tal forma que é possível correlacionar o grau de escurecimento à dose recebida (TAUHATA et al., 2014);

- dosimetria opticamente estimulada (OSL): técnica que utiliza a propriedade de certos tipos de materiais de emitir quantidade de luz proporcional à dose recebida por eles, quando estimulados por uma luz incidente (MCKEEVER, 2001);

- dosimetria termoluminescente (TL): técnica que utiliza a propriedade de certos tipos de materiais de emitir quantidade de luz proporcional à dose recebida por eles, quando aquecidos (MAURÍCIO, 2001).

Nas próximas subseções, serão apresentados conceitos e fundamentos essenciais para a monitoração individual.

2.1 Conceitos básicos da dosimetria de fótons

A dosimetria de fótons compreende a avaliação de doses em indivíduos expostos à radiação ionizante em campos externos de fótons, correlacionado a resposta de monitor individual às grandezas dosimétricas (MAURÍCIO, 2001). Quando aplicada à monitoração individual, consiste na avaliação sistemática da exposição dos IOEs, realizada através de monitores individuais, possibilitando a avaliação da dose externa recebida por estes durante a realização de suas atividades. Os monitores individuais quando irradiados, armazenam informação que será relacionada à uma grandeza operacional, através de um processo de calibração, sendo avaliados em um SMIE(IRD, 1998).

Para apresentação dos conceitos básicos da dosimetria de fótons, é essencial o entendimento das grandezas associadas à dosimetria e a monitoração individual.

2.1.1 Grandezas físicas ou fundamentais

As grandezas físicas ou fundamentais são definidas a partir da quantificação dos produtos gerados pela radiação ionizante ao interagir com um meio. Assim, a partir de medições associadas a estes efeitos, é possível extrair informações sobre a quantidade de radiação ionizante que atinge um material.

As principais grandezas radiométricas utilizadas para quantificar a radiação que poderá interagir com um material são: número e fluxo de partículas ou fótons; energia radiante; fluência e taxa de fluência.

O **número de partículas ou fótons** que são emitidos, transferidos ou recebidos pelo material, poderá ser associado a uma grandeza dosimétrica. Quando este número está associado a um intervalo de tempo, tem-se o **fluxo** de partículas (TAUHATA et al., 2014). Este é formalmente definido como:

- o quociente de **dN** por **dt** , em que **dN** é o incremento do número de partículas ou fótons no intervalo de tempo **dt** .

$$N = \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

Quando este número de partículas ou fótons está associado a uma área do material, pode-se definir a grandeza **fluência** (TAUHATA et al., 2014):

- quociente **dN** por **da** em que o **dN** é o número de partículas ou fótons incidentes em uma esfera infinitesimal com área se seção de choque **da** (TAUHATA et al., 2014).

$$\left(\Phi = \frac{dN}{da}\right) \quad (2)$$

Apesar do número, fluxo ou fluência de partículas ser fundamental para a quantificação da dose em um material, não é suficiente, pois a energia dessas partículas também determinará o valor dessa dose. Assim, pode-se definir como **energia radiante** (TAUHATA et al., 2014):

- a energia das partículas ou fótons que são emitidas, transferidas ou recebidas.

A partir dos produtos da interação da radiação com a matéria, é possível definir grandezas dosimétricas, que são utilizadas para a medição da dose em um material. Dentre elas, destacam-se o kerma, a dose absorvida e a exposição radioativa (TAUHATA et al., 2014).

A grandeza **kerma** está associada a energia transferidas ao material, e definida como:

- a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons **dE_{tr}** , que incidem em um material de massa **dm** (TAUHATA et al., 2014).

$$(K = \frac{dE_{tr}}{dm}) \quad (3)$$

Estas partículas carregadas ao interagirem com o material podem perder sua energia, que normalmente é por dissipação nas colisões sucessivas que ocorrem com outros elétrons, ou na produção de radiação de freamento (bremsstrahlung) (TAUHATA et al., 2014). Assim o Kerma pode ser dividido em duas componentes:

$$K=K_c+K_r \quad (4)$$

onde K_c é Kerma de colisão (, a perda da energia quando localmente dissipada por ionizações e/ou excitações) e K_r é Kerma de radiação (a perda da energia quando dissipada longe do local, por meio de luz ou raios X característicos).

Apesar da grandeza Kerma ser fundamental para quantificar a dose num material, esta depende da energia total transferida. Devido à natureza do material bem como os diversos modos de interação, nem toda energia transferida é absorvida, uma quantidade pode ser absorvida no processo de excitação dos átomos, ou perdida por radiação de freamento (fótons podem escapar do material). Salvo quando existe equilíbrio das partículas carregadas/equilíbrio eletrônico, que ocorre quando a composição atômica e a densidade do meio são homogêneas, o campo de radiação é uniforme e sem a presença de campos elétricos ou magnéticos não homogêneos (TAUHATA et al., 2014). Assim pode-se definir como **dose absorvida**:

- a energia média ($d\bar{\varepsilon}$) depositada pela radiação no material de massa dm , num ponto de interesse (TAUHATA et al., 2014).

$$(D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}) \quad (5)$$

A **exposição** que um material pode estar exposto é dada como valor absoluto da carga total (dQ) de íons do mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados pelos fótons no ar, em um elemento de massa (dm), são completamente freados no ar (TAUHATA et al., 2014).

$$(X = \frac{dQ}{dm}) \quad (6)$$

2.1.2 Grandezas limitantes ou de radioproteção

Apesar das grandezas físicas serem essenciais para a obtenção de medições dosimétricas num material qualquer, quando esse material é o corpo humano, elas não são suficientes para avaliar possíveis efeitos biológicos associados à radiação. Um mesmo valor de dose pode gerar danos bem distintos a depender do tipo da radiação, bem como os tecidos podem ser afetados de formas bem distintas (CNEN, PR 3.01/005, 2011). Para fins de proteção radiológica, foram introduzidas grandezas limitantes que levam em consideração tais questões, possibilitando uma melhor avaliação dos riscos associados à utilização da radiação ionizante (CNEN-NN-3.01, 2014).

As grandezas limitantes são a dose efetiva (E) e a dose equivalente ($H_{T,R}$), utilizadas como referência para definição dos limites de doses individual para trabalhadores e para o público.

A dose equivalente é o produto do valor médio da dose absorvida ($D_{T,R}$) em um órgão ou tecido do corpo humano pelo fator de peso W_R (fator de peso da radiação, considerando a probabilidade de efeitos estocásticos) (CNEN, PR 3.01/002, 2011):

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R} \quad (7)$$

A dose efetiva é a soma das doses equivalentes dos tecidos (H_T) ponderadas nos diversos órgãos e tecidos (W_T)(CNEN, PR 3.01/002, 2011):

$$E = \sum_T W_T H_T \quad (8)$$

No entanto, apesar de serem utilizadas como referência, as grandezas limitantes são definidas apenas teoricamente, não sendo possível a realização de medições dosimétricas nessas grandezas.

2.1.3 Grandezas operacionais

Como descrito anteriormente, as grandezas de proteção radiológica são utilizadas para a definição dos limites de doses e para a verificação do atendimento destes limites, porém elas têm definição apenas teórica, não sendo mensuráveis. Outrossim, as grandezas dosimétricas fundamentais podem ser medidas, porém os resultados não refletem completamente os possíveis efeitos de cada tipo de radiação e a sensibilidade dos órgão e tecidos humanos. Assim, claramente têm-se uma problemática a ser resolvida: como medir a dose de indivíduos de tal forma que estes resultados possam servir de referência para verificar a conformidade com os limites estabelecidos? Nesse contexto, como forma de preencher essa lacuna, são definidas as grandezas operacionais. Estas são mensuráveis e os resultados são excelentes estimativas das grandezas limitantes, considerando os critérios de exatidão estabelecidos.

As principais grandezas operacionais importantes para a obtenção de informações relativas às doses recebidas pelos IOE são: equivalente de dose direcional $H'(d, \Omega)$; equivalente de dose ambiente $H^*(d)$; equivalente de dose individual $H_P(d)$. Para monitoração individual de corpo inteiro, objeto desse estudo, a grandeza operacional adota é o $H_P(10)$.

O $H_P(10)$ avalia o equivalente de dose em tecido mole, numa profundidade 10 milímetros, a partir de um ponto específico na superfície do corpo, e está diretamente relacionado à transferência linear de energia

(IRD,1998, IAEA, No. RS-G-1.3, 1999). Esta grandeza é possível de ser medida diretamente pelo monitor individual, a partir de um processo de calibração utilizando simulador antropomórfico definido pela ICRU (CNEN 3.01/002, 2011; IAEA, No. RS-G-1.3, 1999).

Para estimar a dose efetiva devida à exposição externa utiliza-se o monitor individual colocado em um único ponto do IOE e calibrado em $H_P(10)$.

Para que a grandeza operacional forneça, na maioria dos casos, uma estimativa razoável, a sua razão com o valor da grandeza de proteção deve ser igual ou pouco maior que uma unidade ($\frac{H_{oper.}}{H_{prot.}} \geq 1$) (IRD, 1998). No entanto, essa condição nem sempre é satisfeita, pois limitações do sistema dosimétrico e peculiaridades inerentes às condições de utilização dos monitores individuais, podem acarretar em superestimativas ou subestimativas das doses.

Além do $H_P(10)$, para a estimativa da dose efetiva, obtida em um programa de monitoração individual, pode-se utilizar a grandeza Dose individual, H_X , definida como o produto do valor determinado pelo monitor individual, usado na superfície do tórax, calibrado em termos de kerma no ar, pelo fator $f=1,14$ Sv/Gy. Esta grandeza é, provisoriamente, adotada pelo Brasil (CNEN 3.01/002, 2011). Porém, a nível internacional, e em todos os órgãos que tratam de assuntos relacionados a grandezas de medições, se referem, para a monitoração individual, a utilização da grandeza operacional $H_P(10)$.

As grandezas fundamentais, limitantes e operacionais podem ser interrelacionadas, e a partir da utilização de monitores individuais devidamente calibrados e da utilização de fatores de conversão, pode-se obter uma boa estimativa da dose efetiva, conforme ilustrado na figura 1.

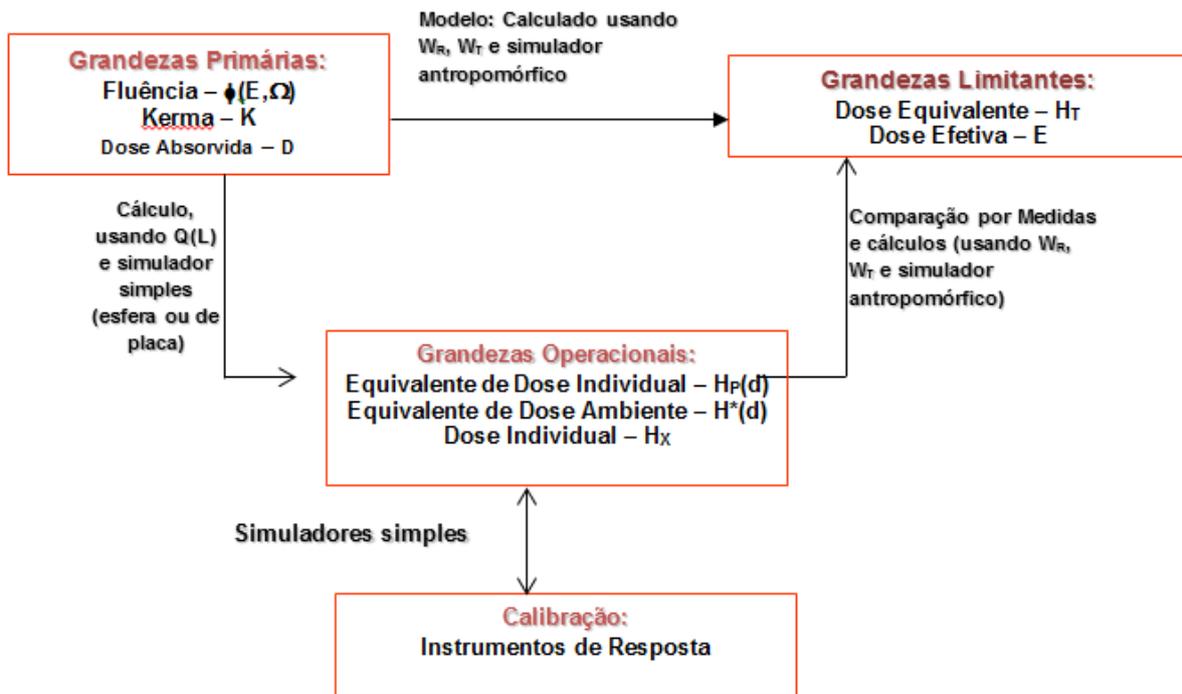


Figura 1: Relação entre as grandezas dosimétricas
 Fonte: IAEA, No. RS-G-1.3, 1999

3. FUNDAMENTOS EM DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE E SISTEMA DOSIMÉTRICO DO LDF/IRD

3.1 Fundamentos em dosimetria termoluminescente

A monitoração individual realizada através da dosimetria termoluminescente é uma atividade complexa que envolve várias etapas: as medições através de equipamentos apropriados; o inter-relacionamento entre as diversas grandezas utilizadas para medir a radiação, incluindo uma metodologia para a conversão dos valores medidos em valores em uma grandeza operacional; a interpretação dos resultados; e um sistema de registro de dados (GARCIA et al, 2009).

Para aplicação de um sistema de monitoração individual é fundamental a compreensão da técnica utilizada, desde os fenômenos físicos que ocorrem nos detectores empregados até os materiais e métodos para avaliação das doses. Devem ser compreendidas as características dosimétricas e propriedades inerentes aos monitores de radiação; os processos que envolvem o armazenamento de informações latentes nos detectores; os métodos de extração dessa informação; a calibração do sistema; a instrumentação utilizada; e todos os aspectos operacionais relacionados à aplicação dos monitores de radiação na dosimetria externa. Neste capítulo, serão apresentados e discutidos conceitos e fundamentos teóricos relacionados à dosimetria termoluminescente, que é a técnica objeto desse estudo.

3.1.1 Descrição do fenômeno da termoluminescência

O fenômeno de termoluminescência é um processo composto por dois estágios fundamentais. No primeiro estágio, o material interage com uma radiação incidente, passando de seu estado de equilíbrio termodinâmico para o estado metaestável, armazenando energia. No segundo estágio, o material é exposto ao calor, sofrendo uma relaxação termo estimulada retornando ao estado de equilíbrio termodinâmico, e liberando a energia armazenada em forma de luz, cujo comprimento de onda é característico do material (MAURÍCIO, 2001). Este fenômeno é verificado nos materiais cristalino isolante

ou semicondutor, capazes de armazenar energia causada pela exposição à radiação, e emitir luz ao ser estimulado por aquecimento (MAURÍCIO, 2001).

A explicação da termoluminescência é baseada no modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons nos cristais, uma vez que a característica cristalina do material TL apresenta uma banda de valência (completamente ocupadas por elétrons) e de condução (esvaziada) separadas por uma faixa de estado energético não permitido denominada banda proibida, como ilustrado na figura 2 (IRD, 2001).

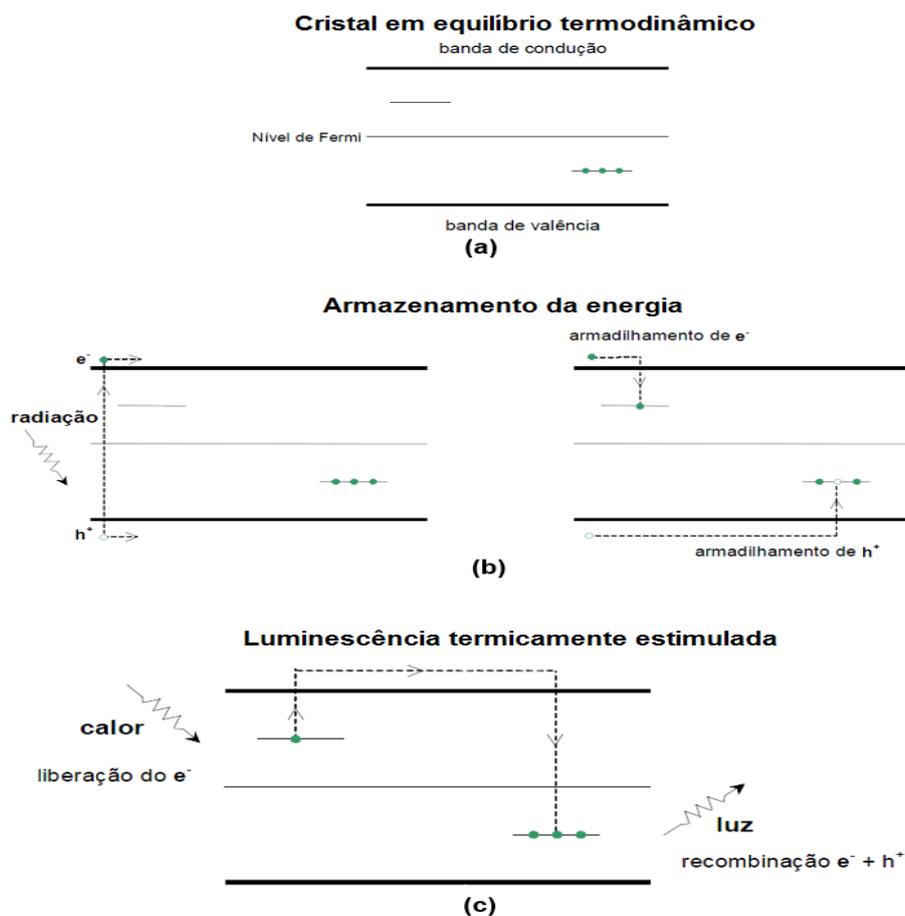


Figura 2: Modelo simplificado da termoluminescência
Fonte: MAURÍCIO, 2001

Na figura 2 (a) é representado o modelo de banda de energia de um material isolante ou material semicondutor em equilíbrio termodinâmico. Os níveis energéticos que se encontram dentro da banda proibida, representam os estados metaestáveis criados por impurezas preexistentes ou outros defeitos existentes no material (MAURÍCIO, 2001).

Na figura 2 (b) os elétrons são excitados e deslocam-se para banda de condução provocando lacunas na banda de valência. Na banda de condução os elétrons por perda de energia cinética são capturados por armadilhas, levando o material TL ao estado metaestável, armazenando informações de parte da energia absorvida pelo material (MAURÍCIO, 2001).

E a figura 2 (c) explica o processo de liberação da energia armazenada na forma de luminescência após o estímulo térmico. E este processo pode ser realizado inúmeras vezes pelo mesmo material (MAURÍCIO, 2001).

Através do aquecimento realizado na avaliação dos materiais TL, é obtida a curva de emissão termoluminescente, definida como a variação da intensidade da luz emitida no segundo estágio do fenômeno de termoluminescência, a uma taxa de aquecimento constante, cujo formato depende de cada material TL e do ciclo de aquecimento definido para a avaliação. Um formato típico da curva TL, com pico bem definido, está apresentado na figura 3. (MAURÍCIO, 2001).

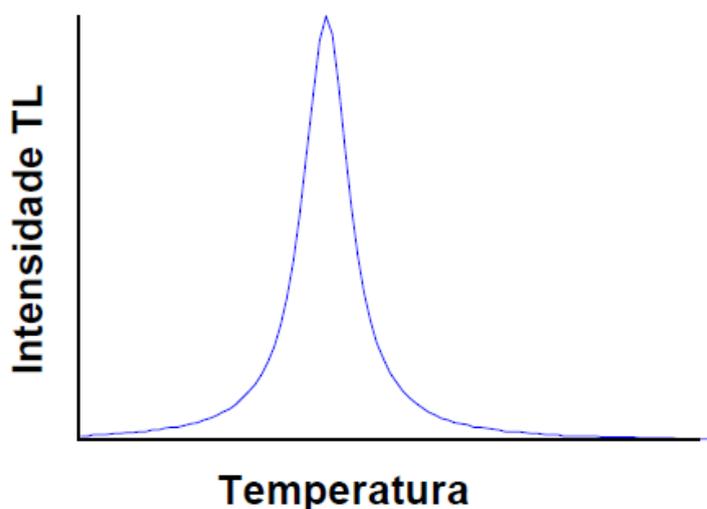


Figura 3: Exemplo de um pico de emissão TL
Fonte: MAURÍCIO, 2001

3.1.2 Termoluminescência aplicada à dosimetria

A termoluminescência é um fenômeno que pode ser aplicado na dosimetria uma vez que a intensidade da luz, emitida por um material TL, depende da quantidade da radiação que o material recebe (figura 1). Quando o

material TL previamente irradiado é estimulado por meio de calor, a intensidade luminescente em função da temperatura será quantificada e relacionada com a radiação incidente (IRD, 2001).

Portanto, o material TL é utilizado como detector de medição de dose fazendo proveito de suas propriedades que permitem a conservação e/ou armazenagem da energia recebida, num período desejável (IRD, 2001). A análise das propriedades do material TL é realizada para assegurar o seu desempenho adequado em termos de resposta TL, perante uma série de condições de irradiação e do local de armazenamento do detector, bem como conhecer as fontes de incerteza a que o sistema TL pode conter [18]. O desempenho do sistema dosimétrico também depende de todo o processo intermediário necessário para a sua preparação, como tratamentos térmicos, armazenamento, procedimentos de avaliação, bem como o algoritmo utilizado e o sistema de calibração (MAURÍCIO, 2001; IAEA, 2006). Assim, as propriedades analisadas podem envolver os seguintes aspectos: reprodutibilidade, linearidade da resposta, dependência energética e angular, estabilidade da informação armazenada, desvanecimento, limite inferior de detecção, sensibilidade à luz e influências de condições ambientais. Estas propriedades são resumidamente apresentadas a seguir.

3.1.2.1 Reprodutibilidade do sistema TL

Para que um material TL seja utilizado em dosimetria, o sistema de medição deve possuir a característica de reproduzir as mesmas respostas TL em sucessivas irradiações (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979). Essa propriedade é denominada reprodutibilidade, e pode ser expressa, para determinados casos, pelo desvio-padrão de várias medidas realizadas pelo mesmo monitor individual sob possíveis variações intrínsecas as condições de irradiação e leitura. Quanto menor for o desvio padrão, melhor é a reprodutibilidade (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

3.1.2.2 Linearidade da resposta do sistema TL

A linearidade da resposta verificada no material TL indica a proporcionalidade, independente da taxa de dose, entre resposta TL e a dose absorvida pelo monitor individual. Esta propriedade é uma característica desejável para os materiais TL, porém, apresentam resposta TL em três regiões: linear, supralinear e de saturação, como demonstra a figura 4a (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979). Quando o quociente entre a resposta TL ($R(D_1)$), numa determinada dose D_1 , e uma dose de referência D_0 for igual a uma unidade, verifica-se a linearidade (equação 9). Se o quociente for maior do que 1 a região apresenta a saturação, e caso este seja menor que 1 observa-se uma região supralinear, como ilustrado na figura 4a (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

$$F(D_1) = \frac{R(D_1)}{R(D_0)} \quad (9)$$

Na região linear, os pontos do gráfico da resposta TL em função da dose recebida, deveriam estar contidos na mesma reta. Quando o material TL apresenta boa linearidade, essa condição é obtida de forma aproximada, conforme apresentado na figura 4b.

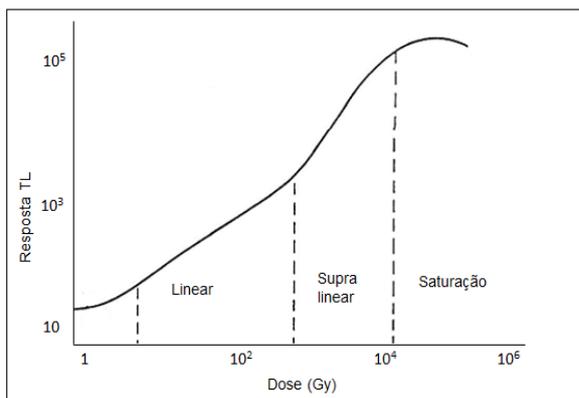


Figura 4 (a): Resposta do material TL

Fonte: MCKEEVER et al. 1995

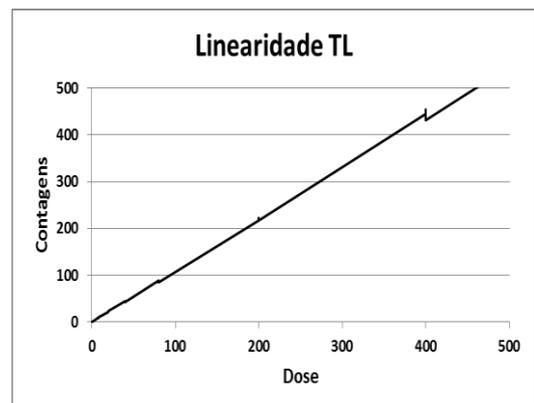


Figura 4 (b): Região linear do material TL em

função da dose (LiF:Mg,Ti (TLD-100))

Fonte: Autora

3.1.2.3 Dependência energética do sistema TL

Quando um material TL é submetido a campos de radiação diferentes, na mesma condição de irradiação, espera-se que a sua resposta seja a

mesma, independente da energia da radiação incidente. Porém, este efeito não é observado, a resposta pode variar dependendo da qualidade do feixe. A variação da resposta TL, para uma mesma dose, em função da energia da radiação absorvida é definida como dependência energética (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

3.1.2.4 Dependência angular do Sistema TL

A resposta TL do material varia em função do ângulo de irradiação. Para que a dose medida no monitor individual consiga estimar o valor da radiação aplicada é preciso realizar a calibração na grandeza de interesse considerando os ângulos em que supostamente o material TL pode se encontrar no momento da irradiação. Para minimizar a influência angular, podem ser utilizados fatores de correção adequados para ajustar a alteração da resposta TL (MAURÍCIO, 2001).

3.1.2.5 Desvanecimento do sinal TL (fading)

A resposta do material TL pode demonstrar algumas mudanças durante seu armazenamento após a irradiação. Foi verificado que os defeitos do material TL atuam como centros de captura e de recombinação, e estes podem sofrer alterações, causadas por fatores externos como a temperatura, que resultem na redução da quantidade de elétrons aprisionados (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979). Devido à temperatura ambiente, pode existir a probabilidade de ocorrer uma liberação térmica da carga armadilhada e proceder-se a recombinação. Neste caso, a resposta TL diminui com o tempo, e assim considera-se que o sinal desvanece (*fading*), devido a fuga espontânea das cargas armadilhadas (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

O desvanecimento é influenciado também pela umidade e iluminação presente no meio ambiente.

3.1.2.6 Sensibilidade à luz do monitor individual

Quando o material TL é sensível à luz, a probabilidade de ocorrência de desvanecimento óptico é alta. Este desvanecimento é verificado quando a luz de qualquer fonte exposta ao material TL é absorvida, podendo ocorrer transições eletrônicas no material, que podem causar a liberação de elétrons presentes nas armadilhas. Logo, é importante a escolha do material TL em relação à estabilidade da sua resposta nas condições de ambiente de utilização (MAURÍCIO, 2001).

3.1.2.7 Limite inferior de detecção do sistema TL

O limite inferior de detecção é definido como o menor valor da dose que se pode distinguir da dose zero no material TL. O material TL precisa garantir o armazenamento das informações provenientes de radiações de baixas doses e energia, e este, não perder a linearidade da resposta durante a avaliação (IRD, 1998). Este limite depende também do sistema TL, que deve ser capaz de avaliar a dose de nível de registro (MAURÍCIO, 2001).

3.1.2.8 Sinal residual do Detector TL

A irradiação de um material TL com altas doses pode causar defeitos na sua rede cristalina que não possam ser mais revertidos. Estes defeitos, podem incrementar a resposta TL antes do monitor individual ser irradiado (sinal residual). No entanto, após vários ciclos de irradiação e aquecimento, sempre há um sinal residual crescente. A sensibilidade do material TL é modificada pelo seu histórico (ciclos de irradiação e aquecimento) bem como a exposição de altas doses (MAURÍCIO, 2001).

3.1.2.9 Homogeneidade do lote de monitores individuais

Ao empregar um lote para monitoração individual externa, os monitores individuais devem responder consideradamente igual, perante uma única condição de irradiação. Com o lote homogêneo não haverá a necessidade de fatores de calibração individual, ou seja, ter um fator calibração diferente para

cada monitor individual. A homogeneidade acarreta a ideia de obter a razão das respostas entre os monitores individuais do mesmo lote seja próxima de 1 (MAURÍCIO, 2001; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

3.1.2.10 Características de alguns materiais TL comercializados

Perante as propriedades descritas anteriormente, alguns materiais TL comercializados, que são dopados com ativadores apropriados para incrementar os defeitos da rede (aumento de estados metaestáveis), apresentam as seguintes características gerais (Tabela 2) (IAEA, 1999):

Tabela 1: Características de alguns materiais TL comercializados

Tipo de monitor individual	Número atômico efetivo Zeff	Temperatura de pico principal (°C)	Espetro de emissão (nm)	Sensibilidade	Desvanecimento
LiF:Ti,Mg	8,3	200	400	1	5% por ano ^b
LiF:Na,Mg	8,3	200	400	1	5% por ano ^b
LiF:Mg,Cu,P	8,3	210	400	25	5% por ano ^b
Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	7,3	220	605	0,20 ^a	4% por mês
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	7,3	205	368	2 ^a	10% por mês ^b
MgB ₄ O ₇ :Dy	8,4	190	490	10a	4% por mês ^b
CaSO ₄ :Dy	14,5	220	480-570	30 ^b	1% por cada 2 meses

^aSensibilidade da luz.

^bDesvanecimento no escuro (após um recozimento de pós-irradiação de 15 minutos a 100°C) relacionados com o armazenamento de 1 dia.

Fonte: IAEA, No. RS-G-1.3, 1999

3.1.3 Instrumentação para dosimetria termoluminescente

3.1.3.1 Descrição

A instrumentação básica necessária para monitoração individual através da técnica de dosimetria TL são as seguintes: detector termoluminescente (TL); monitor individual; leitor TL, fornos para tratamento térmico; equipamentos para o manuseio dos monitores e detectores, que são resumidamente descritos a seguir (MAURÍCIO, 2001; IRD, 1998).

3.1.3.2 Detector TL

Os tipos de detectores utilizados na monitoração individual para fótons apresentam variedade de formas como, cristais, pó, barra, prensados a frio ou

quente e encapsulados para leitura automática. Estes são classificados como detectores passivos, que registram doses para posteriormente serem processados (TAUHATA et al., 2014). Na escolha do detector, devem ser consideradas não só as suas propriedades, com também as especificações de desempenho e peculiaridades do serviço prestado (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

Os principais detectores utilizados são: LiF (fluoreto de lítio); CaSO₄:Dy (sulfato de cálcio dopado com disprósio); CaSO₄:Mn (sulfato de cálcio dopado com manganês); e CaF₂ (fluorita) (TAUHATA et al., 2014; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

3.1.3.3 Monitor individual

O monitor individual é composto por um ou mais detectores TL, e compreende o conjunto completo a ser utilizado, incluindo assim os suportes e possíveis invólucros protetores. Geralmente, o monitor individual possui também uma quantidade de filtros cuja função principal é permitir a obtenção de informações sobre o espectro de energia do campo de irradiação para a realização de possíveis correções de energia, melhorando assim a exatidão dos resultados (IRD-RT 002.02, 2010).

3.1.3.4 Leitor TL

O leitor TL ou dosímetro é o equipamento utilizado para avaliar a dose recebida pelo monitor individual através da obtenção de sinal associado à luz emitida pelo detector TL. Este sinal deve ser proporcional à dose recebida, que poderá ser quantificada a partir do processo de calibração (TAUHATA et al., 2014).

O Leitor de TL deve ser capaz de garantir a reprodutibilidade do ciclo térmico, e este pode ser manual, semiautomático ou automático, que consiste basicamente em um sistema de detecção de luz, registro de dados e sistema de aquecimento. (MAURÍCIO, 2001).

O sistema de aquecimento pode ser realizado de diversas formas, sendo as mais comuns, os métodos de aquecimento por resistência elétrica e gás nitrogênio. A resistência elétrica geralmente é adaptada para diferentes tipos e tamanhos de detector TL, e seu aquecimento é controlado através da voltagem aplicada. O gás nitrogênio apresenta vantagens em fornecer um aquecimento uniforme para o detector TL, reduz o tempo de aquecimento, possui uma ótima reprodutibilidade, e pode ser utilizado para qualquer tipo e forma de detector TL. Porém, o seu ciclo de aquecimento não é linear (MAURÍCIO, 2001; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

O sistema de detecção de luz do leitor TL é composto por um tubo fotomultiplicador, que detecta a luz emitida pelo detector TL. Esta luz, após a sua detecção, é convertida na fotomultiplicadora e pode ser coletado por um receptor de dados analógico ou digital. A figura 5 ilustra o funcionamento do leitor TL (MAURÍCIO; IRD, 2001).

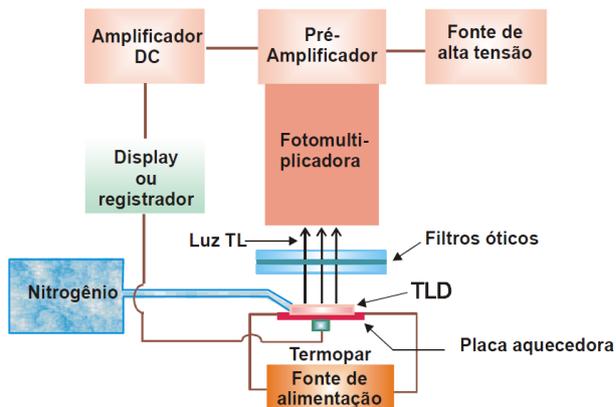


Figura 5 (a): Esquema básico do funcionamento do leitor
Fonte: TAHUATA et. al, 2014

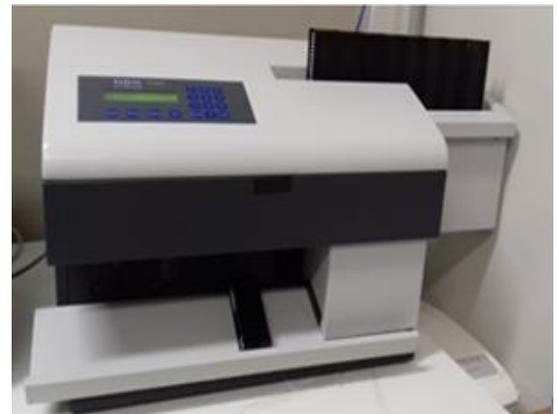


Figura 5 (b): Exemplo de leitor TL
Fonte: Autora

Geralmente, o sinal registrado pelo leitor é transmitido e armazenado em um computador associado ao leitor, em que, através de aplicação de um algoritmo para cálculo da dose, é possível chegar ao resultado da medição já na grandeza operacional empregada na monitoração (MAURÍCIO; IRD, 2001).

3.1.3.5 Fornos para tratamento térmico

Os fornos são utilizados para o tratamento térmico do detector TL fora do leitor, e devem possuir um bom controle de temperatura, com a mesma taxa de aquecimento e resfriamento, de modo que todos os detectores TL atinjam a temperatura pretendida no mesmo intervalo de tempo. É importante a utilização exclusiva do forno para o recozimento dos detectores TL, evitando assim a contaminação dos detectores que poderá alterar a resposta TL. (IRD, 2001; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

3.1.3.6 Pinças para manipulação do detector TL

As pinças são utilizadas para manipular os detectores TL que não se encontrem em forma de pó, nem incorporados em cartões e/ou monitores para processamento automático, evitando o contato direto com mão ou outro objeto que possa contaminar a superfície dos mesmos. Estas pinças podem ser metálicas ou a vácuo. As pinças metálicas apresentam como desvantagem induzir possíveis sinais provenientes da triboluminescência, causado quando o manuseio do detector é realizado de forma errada a ponto de provocar arranhadura na sua superfície (IRD, 2001; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979). As pinças a vácuo são ideais para manipular os detectores TL, visto que possuem um método de manuseios eficaz que dificilmente poderá danificar o detector TL. Estas são compostas por uma bomba a vácuo conectada a um tubo de pequeno diâmetro contendo um orifício que permite a manipulação dos TLD, como ilustrado na figura 6 (IRD, 2001; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

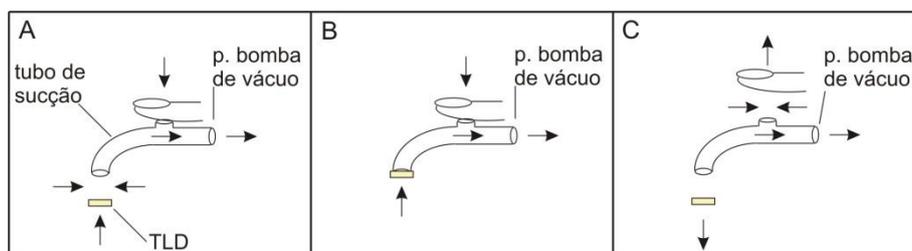


Figura 6: Diagrama do uso de pinça a vácuo: (a) início da sucção do TLD, (b) movimentação do TLD preso na pinça a vácuo e (c) liberação do TLD

Fonte: IRD, 2001

3.1.4 Aspectos operacionais da dosimetria TL

A dosimetria TL é uma atividade complexa que envolve várias etapas para a avaliação e obtenção da dose efetiva. São apresentadas a seguir, de forma sucinta, os objetivos e fundamentos dos procedimentos básicos de dosimetria termoluminescente.

3.1.4.1 Descrição geral dos principais procedimentos técnicos

- *Formação de lotes de minitores individuais*

O lote de monitores individuais é um grupo de detectores TL cujas respostas são consideradas iguais (apresenta um desvio padrão igual ou inferior ao limite estabelecido em procedimento). Para a formação de um lote, os monitores individuais são avaliados com e sem irradiação prévia, e os resultados são analisados através de planilha específica, permitindo assim a formação dos lotes e o devido registro (IAEA, 2006).

- *Tratamento térmico*

O tratamento térmico pré-irradiação, também chamado de “recozimento”, tem como objetivo eliminar possíveis sinais TL existentes no monitor individual devido à irradiação de background ou irradiações anteriores por outras fontes. Este pode ser realizado em forno pré-programável, com temperatura, tempo e periodicidade definida em procedimento, ou no leitor TL (IRD, 1998; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

O tratamento térmico pós-irradiação tem como objetivo principal eliminar os picos do sinal TL menos estáveis, reduzindo a influência do “fading”, garantindo uma maior independência entre o valor da dose avaliado e o tempo entre a irradiação e a leitura do monitor individual. Este pode ser realizado no leitor TL através de uma leitura normal dos monitores individuais (IRD, 1998; OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

- *Irradiação dos monitores individuais*

A irradiação tem como objetivo a exposição dos monitores individuais a doses conhecidas na grandeza operacional escolhida para embasar e elaboração da curva de calibração e o fator de calibração do sistema. A irradiação também pode ser utilizada para a formação de lotes, controle de qualidade do sistema dosimétrico e para o acompanhamento periódico do desempenho desse sistema (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

- *Calibração do sistema dosimétrico*

Como anteriormente referido, os monitores individuais devem ser adequadamente calibrado para fornecer uma boa estimativa da dose efetiva. A calibração deve ser realizada por um laboratório de metrologia que atende critérios legais e de qualidade, de forma que seja garantida a rastreabilidade metrológica (laboratório primário, secundário, terciário etc, de uma rede de calibração). A calibração estabelece, sob condições específicas, a relação entre a quantidade indicada por um monitor individual e o valor correspondente da dose baseado em padrões estabelecidos em laboratório (GARCIA at all, 2009; IAEA-CDOC-1126,1999). Para a grandeza $H_P(10)$, os dosímetros devem ser calibrados usando simuladores antropomórficos definidos pela ICRU (VALENTIN, 2007). É importante também realizar procedimentos de controle de qualidade na rotina, para verificar a validade da calibração, ou seja, se o fator de calibração ainda é o adequado. A Calibração pode ser individual, quando cada monitor individual possui um fator de calibração próprio, ou pode ser relativa a um lote de monitores individuais, em que a resposta destes são consideradas estatisticamente iguais (IAEA-CDOC-1126,1999; BOHM. J).

Em geral, o fator de calibração é definido como a razão entre a dose de referência na grandeza adotada e o valor líquido medido no monitor individual M . Para a grandeza $HP(10)$, objeto desse estudo, essa razão pode ser apresentada através da equação (10).

$$N = \frac{H_P(10)}{M} \quad (10)$$

O valor medido M é o valor resultante da subtração entre a média das respostas de n monitores individuais irradiados e a média das respostas dos mesmos não irradiados (radiação de background). Este leva em consideração outros efeitos que são representados pelos fatores de correção apropriados (k_{ci}), para corrigir o valor indicado no monitor individual, tal como ilustra a equação 11 (BOHM. J).

$$M = (M_1 - M_2) \prod_i k_{ci} \quad (11),$$

Onde o índice adicional c em k_{ci} indica que este fator de correção é específico para a calibração.

O valor de referência $H_p(10)$ é determinado a partir de kerma no ar utilizando os coeficientes de conversão, $h_{pk}(10, E, \alpha)$, apropriados para a energia E da radiação de fótons e um ângulo α entre a direção do monitor individual e a direção da radiação incidente, de acordo com a equação 12 (BOHM. J).

$$H_p(10) = h_{pk}(10, E, \alpha) \cdot K_a \quad (12)$$

Durante os procedimentos para avaliação da dose, estão associadas variáveis que influenciam na resposta do detector TL, e conseqüentemente, na exatidão das medições TL. Portanto, para minimizar esta influência é realizada a calibração do sistema, para campos com a mesma qualidade de radiação. Em casos que os campos de radiação são diferentes, é necessário conhecer as suas diferenças e aplicar fator de correção, filtros e/ou os respectivos algoritmos (BOHM. J).

- *Leitura dos TLD*

É realizada a leitura dos monitores individuais visando obter o valor de uma determinada grandeza que possa ser associada ao valor da dose determinada em uma grandeza operacional de dosimetria (MAURÍCIO, 2001).

- *Controle de qualidade dos TLD usados na rotina*

A resposta TL é influenciada por variáveis que possam ser verificadas durante o processo de calibração e avaliação da dose. Sendo assim, é realizado o controle de qualidade para monitorar a resposta do monitor individual e o envelhecimento do lote. Este controle objetiva também a verificação física do monitor (GARCIA et al., 2009).

- *Algoritmo para avaliar o valor de dose*

Após a leitura dos sinais (S_g) obtidos através da informação da dose armazenada no detector TL, para a avaliação da dose, aplica-se o algoritmo implementado para o sistema de dosimetria, representado pela equação 13.

$$E = f(S_g) \quad (13)$$

Onde E é o valor da dose a ser reportada. Como exemplos das etapas associadas ao algoritmo de avaliação de doses são: a aplicação de um fator de calibração; a utilização de um fator de sensibilidade do detector; a utilização de sistema computacional para processamento de sinais; aplicação de métodos de correção de energia (IEC 61066, 2006).

3.1.4.2 Avaliação do desempenho do SMIE

Um objetivo fundamental de dosimetria individual para fótons é fornecer uma medida confiável da grandeza de interesse em todas as situações independentemente do tipo, energia e a direção de incidência da radiação e de outros fatores que contribuem para a incerteza de medição. Porém, esta condição é de difícil obtenção, pois muitas fontes de incerteza influenciam na avaliação da dose, especialmente aquelas relacionadas às diferenças entre o campo de calibração do sistema e o campo de irradiação a qual o monitor individual está submetido.

Como a incerteza inerente à técnica de medição é alta, a tolerância para as medidas realizadas em um programa de monitoração também é alta,

de tal forma que, para doses muito baixas, a tolerância é maior do que aquela para as doses mais altas. Isso é justificado pelo fato de que, para doses baixas, as incertezas relativas são maiores. Essa questão fez com que a ICRP definisse um nível de registro, em que, abaixo deste valor, as doses não devem ser registradas, pois além de baixíssimo risco associados a elas, as incertezas na medição são tão altas que o resultado não é confiável (IAEA, No. RS-G-1.3, 1999).

Como forma de padronizar a interpretação da exatidão dos resultados das medidas realizadas pelo sistema dosimétrico, a ICRP definiu um método que contempla tolerâncias diferentes para faixas de doses distintas. Nesse método, o limite superior (R_{LS}) e o limite inferior (R_{LI}) aceitáveis na monitoração individual de fótons são definidos pelas equações 14 e 15 (IAEA-CDOC-1126,1999):

$$R_{LS} = 1.5 \times \left(1 + \frac{H_0}{2H_0 + H_1} \right) \quad (14)$$

$$R_{LI} = \begin{cases} 0, & H_1 < H_0 \\ \frac{1}{1.5} \left(1 - \frac{2H_0}{H_0 + H_1} \right), & H_1 \geq H_0 \end{cases} \quad (15)$$

Onde: H_0 é a dose mais baixa necessária para ser medida (nível de registro), e H_1 é o valor verdadeiro convencional. Quando definidos os valores das variáveis, essas equações permitem que seja plotada uma curva de tolerância denominada Curvas Trombeta, devido ao seu formato que é semelhante ao instrumento musical, conforme pode ser visualizado na figura 7. As curvas trombeta são o principal método de análise de desempenho de um sistema dosimétrico, independente da técnica empregada (IAEA-CDOC-1126,1999).

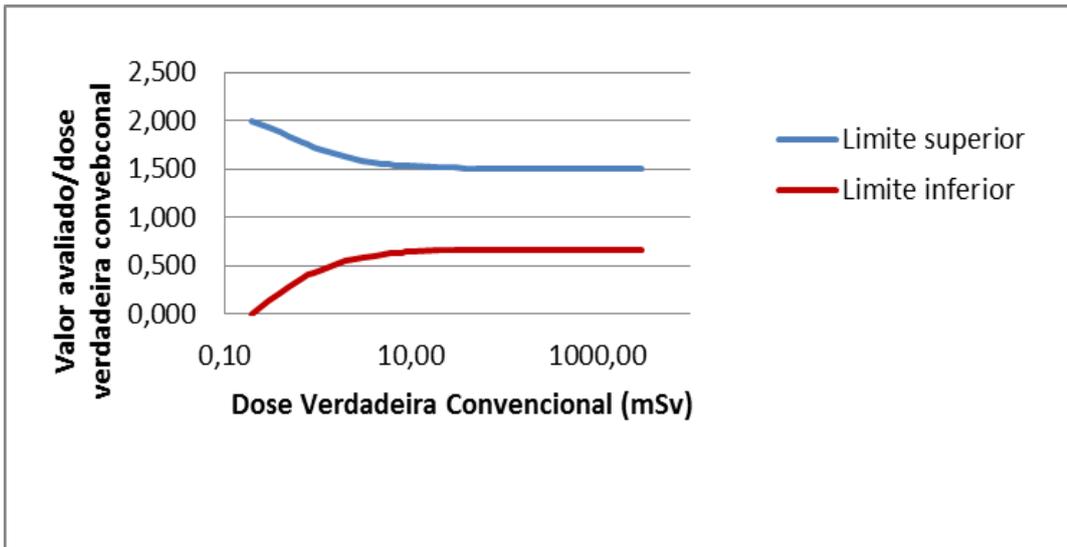


Figura 7: Exemplo de uma curva trombeta plotada utilizando dados do desempenho mensal de SMIE 1, obtidos no programa de acompanhamento para de avaliação do desempenho dos SMIEs Brasileiro, realizado pelo CASEC.

Fonte: Autora

3.2 Sistema de dosimetria TL do SMIE do IRD para fótons de corpo inteiro

Para descrição do sistema de dosimetria TL do SMIE do IRD, foram utilizadas as informações obtidas através das atividades práticas realizadas nesse estudo e aquelas fornecidas pelo responsável técnico do SMIE, conforme indicado pelo documento que autoriza a utilização das informações do sistema dosimétrico do SMIE (Anexo I).

O SMIE do IRD utiliza a técnica de dosimetria termoluminescente para a medição na grandeza Dose Individual - H_x , para a avaliação de doses de corpo inteiro para fótons. No entanto, há uma perspectiva futura de avaliar as doses recebidas pelos indivíduos utilizando a grandeza Equivalente de Dose Individual - $H_p(10)$.

O sistema dosimétrico possui as seguintes características: um limite inferior de detecção de 0,1 mSv; uma faixa de detecção de doses de 0,2 mSv a 2 Sv; e faixa de energia de 20 keV até 1250 keV.

A instrumentação contemplada pelo SMIE do IRD é a seguinte:

- Três fornos programáveis, modelo TLD-Oven e fabricante PTW-FREIBURG, que trabalham em atmosfera normal;
- Bandejas para tratamento térmico de TLD contendo 270 alojamentos, utilizadas para suporte de detectores TL no forno, fabricadas pelo próprio IRD;
- Um irradiador, que utiliza fonte de ^{90}Sr , de modelo RE 2000A e fabricante RadPro;
- Dois leitores TL, com o sistema de aquecimento através de gás nitrogênio, de modelo RE-2000 e fabricante RadPro;
- Ferramentas para manuseio do detector TL: pinça a vácuo e metálica, suporte para abrir o porta-cartão, suporte para abrir os monitores, cassete que permite agrupar 20 porta-cartões, fabricados pela RadPro;

Os monitores individuais são compostos por um suporte de detectores TL, um cartão com quatro posições para detectores com identificação única de código de barra e dois detectores TL (LiF:Mg, Ti), usados na posição 1 e 3 do cartão. A posição 1 possui 1 filtros de alumínio de 1 mm de espessura e a posição 3 está sob o plástico, como ilustrado nas figuras 8 e 9.

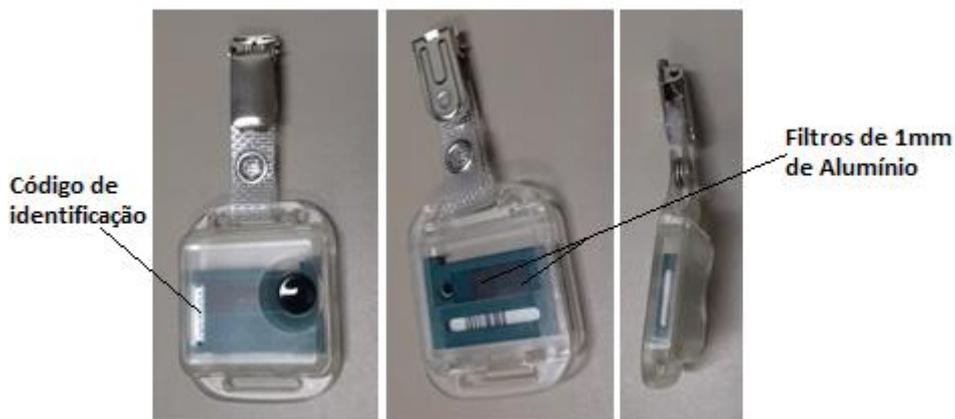


Figura 8: Vistas frontal, posterior e lateral de monitor individual do SMIE do IRD para fóton
 Fonte: Autora



Figura 9 (a): Componentes do monitor individual de corpo inteiro
 Fonte: DA SILVA. SMIE IRD, 2016

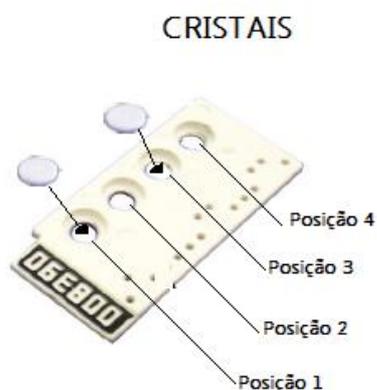


Figura 9 (b): Descrição das posições de inserção de cristais no cartão de TLD
 Fonte: DA SILVA. SMIE IRD, 2016

3.2.1 Procedimentos técnicos

Os procedimentos utilizados no SMIE do IRD para obtenção de doses recebida por um indivíduo são apresentados nesta seção.

A primeira etapa realizada quando o detector TL chega do fabricante é o tratamento térmico (tratamento pré-irradiação). Em seguida são realizados os procedimentos para formação dos lotes, que a posterior, decorre a irradiação dos monitores TL para obtenção do fator de calibração do lote. A inspeção visual da integridade física dos monitores individuais deve ser realizada durante a rotina de trabalho. A figura 10 apresenta o fluxograma desses procedimentos técnicos.



Figura 10: Fluxo de processos realizados antes dos monitores serem utilizados na rotina
 Fonte: DA SILVA. SMIE IRD, 2016

Durante a rotina de utilização dos monitores individuais, são realizadas as seguintes etapas: tratamento térmico pré-irradiação, antes de enviar o monitor individual para o usuário; montagem do monitor e posterior envio ao cliente. Após o recebimento do monitor utilizado, é realizado o procedimento para a leitura e avaliação das doses, que inclui a desmontagem do monitor, tratamento térmico pós-irradiação, controle de qualidade, avaliação da dose indicada pelo monitor e associada ao usuário. Na figura 11, é apresentado o fluxograma da realização dos principais procedimentos técnicos realizados na rotina.

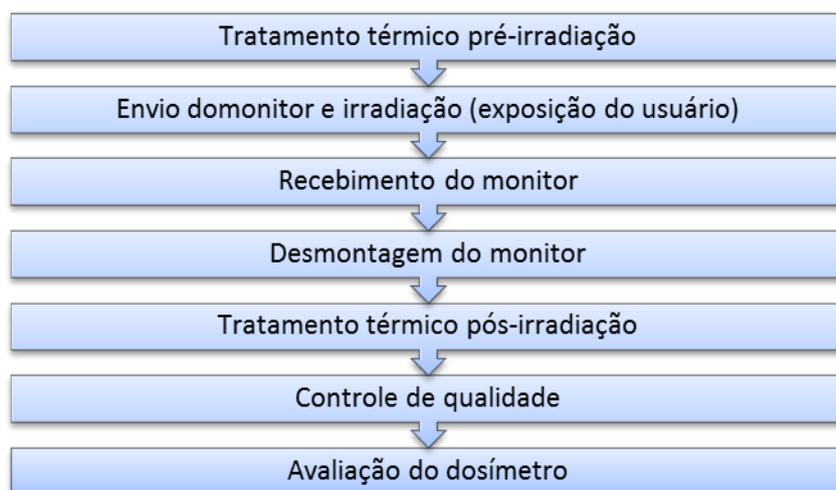


Figura 11: Fluxo dos principais procedimentos realizados na rotina.
 Fonte: DA SILVA. SMIE IRD, 2016

3.2.1.1 Tratamentos térmicos

Para que os monitores individuais sejam submetidos a um tratamento térmico nos fornos pré-programáveis, são separados dos respectivos monitores e manuseados cuidadosamente conforme procedimentos estabelecidos.

Antes da utilização dos monitores individuais na rotina, estes devem passar por um tratamento térmico pré-irradiação. Durante a rotina, antes dos monitores individuais serem enviados ao usuário, os detectores TL são submetidos ao tratamento térmico pré-irradiação, realizado no leitor TL, perante uma leitura usando os mesmos parâmetros utilizados para a avaliação de doses.

Para a avaliação de doses, os monitores individuais são submetidos a um tratamento térmico pós-irradiação, realizado no leitor TL, utilizando parâmetros estabelecidos em procedimentos técnicos.

3.2.1.2 Formação de lotes de monitor individual

A primeira fase realizada para a formação do lote é a seleção dos monitores individuais de um mesmo lote de fabricação, através de uma verificação física, a fim de descartar os monitores que apresentam defeitos considerados inapropriados para a monitoração individual. Em seguida, é realizado o tratamento pré-irradiação, com a posterior etapa de selecionar os detectores TL obedecendo dois critérios: resposta homogênea, com ou sem irradiação, e resposta baixa sem irradiação (dose zero). Por fim, calcula-se a média, o desvio padrão (s_0), o desvio padrão percentual das avaliações com os valores obtidos na leitura de dose zero e leitura após irradiação de todo o grupo dos monitores individuais, que com estes valores são indicados quais respostas apresentam desvios fora dos limites de aceitação pré-determinados.

3.2.1.3 Calibração do sistema TL

O sistema do IRD é calibrado na grandeza H_x . Para a calibração são selecionados aleatoriamente 60 monitores individuais do lote a ser calibrado e divididos em 15 grupos de 4 monitores cada. O grupo zero é considerado grupo

de referência, e os outros grupos são submetidos a irradiação de acordo com os critérios estabelecidos, utilizando os seguintes valores de dose:

Grupo 1: 0,2 mGy; Grupo 2: 0,4 mGy; Grupo 3: 0,6 mGy; Grupo 4: 0,8 mGy; Grupo 5: 1,0 mGy; Grupo 6: 1,3 mGy; Grupo 7: 1,6 mGy; Grupo 8: 2 mGy; Grupo 9: 2,5 Gy; Grupo 10: 3,0 mGy; Grupo 11: 3,5 mGy; Grupo 12: 4,0 mGy; Grupo 13: 5,0 mGy; Grupo 14: 10,0 mGy.

Após a irradiação é realizada a avaliação dos monitores para cada posição dos detectores TL (posição 1 e 3), subtraindo o valor médio do número de contagens dos monitores do grupo 0 com o número de contagens registrado por cada monitor irradiado, para obtenção da contagem líquida.

3.2.1.4 Controle da qualidade dos monitores individuais usados na rotina

O controle da qualidade deve ser realizado para monitorar a resposta do monitor individual, a integridade física dos monitores e o envelhecimento de lotes. A avaliação da integridade física dos monitores é realizada através dos procedimentos para verificação do suporte do monitor individual, suporte do cartão e da fixação dos filtros. A reavaliação das respostas dos monitores individuais e o controle de envelhecimento dos lotes é realizado através de irradiação dos monitores teste utilizando o irradiador de ^{90}Sr .

3.2.1.5 Avaliação de monitor individual e algoritmo de cálculo de dose

Na avaliação dos monitores individuais, a umidade relativa do ambiente deve ser menor que 90%, com uma temperatura no máximo de 25 °C.

Para a avaliação dos monitores individuais é realizado um tratamento pós-irradiação, onde os monitores são submetidos a uma temperatura de 150°C por 1,5 segundos, para eliminar os picos do sinal TL instáveis, seguido de uma temperatura de 300°C com a mesma duração de 1,5 segundos, para a leitura dos monitores.

Para a avaliação das doses registradas pelos monitores, é utilizado o algoritmo cujo fluxo de cálculo depende da dose avaliada no monitor e da razão

entre os valores das leituras dos dois detectores TL das posições 1 e 3 do monitor. De forma básica, o algoritmo realiza a sequência abaixo.

1) Após a realização da leitura do monitor, apenas a dose do detector TL da posição 3 é analisada. Se esta dose for menor que 1 mSv, o valor reportado é aquele indicado apenas no detector da posição 3;

2) Se a dose apresentada pelo detector TL da posição 3 for maior ou igual a 1 mSv, deverá ser calculada a razão entre os resultados dos dois detectores TL da posição 1 e da posição 3, respectivamente.

3) Se o resultado obtido da razão supracitada for maior ou igual a 0.8, será considerado que o monitor individual esteve perante a um campo de alta energia e o resultado reportado será o valor médio das duas posições dos detectores TL.

4) Caso o resultado da razão for menor que 0.8, será considerado que o monitor individual esteve perante a um campo de energia baixa, e o resultado reportado será aquele indicado pelo detector da posição 3. A figura 12 apresenta o algoritmo descrito na forma de fluxograma.

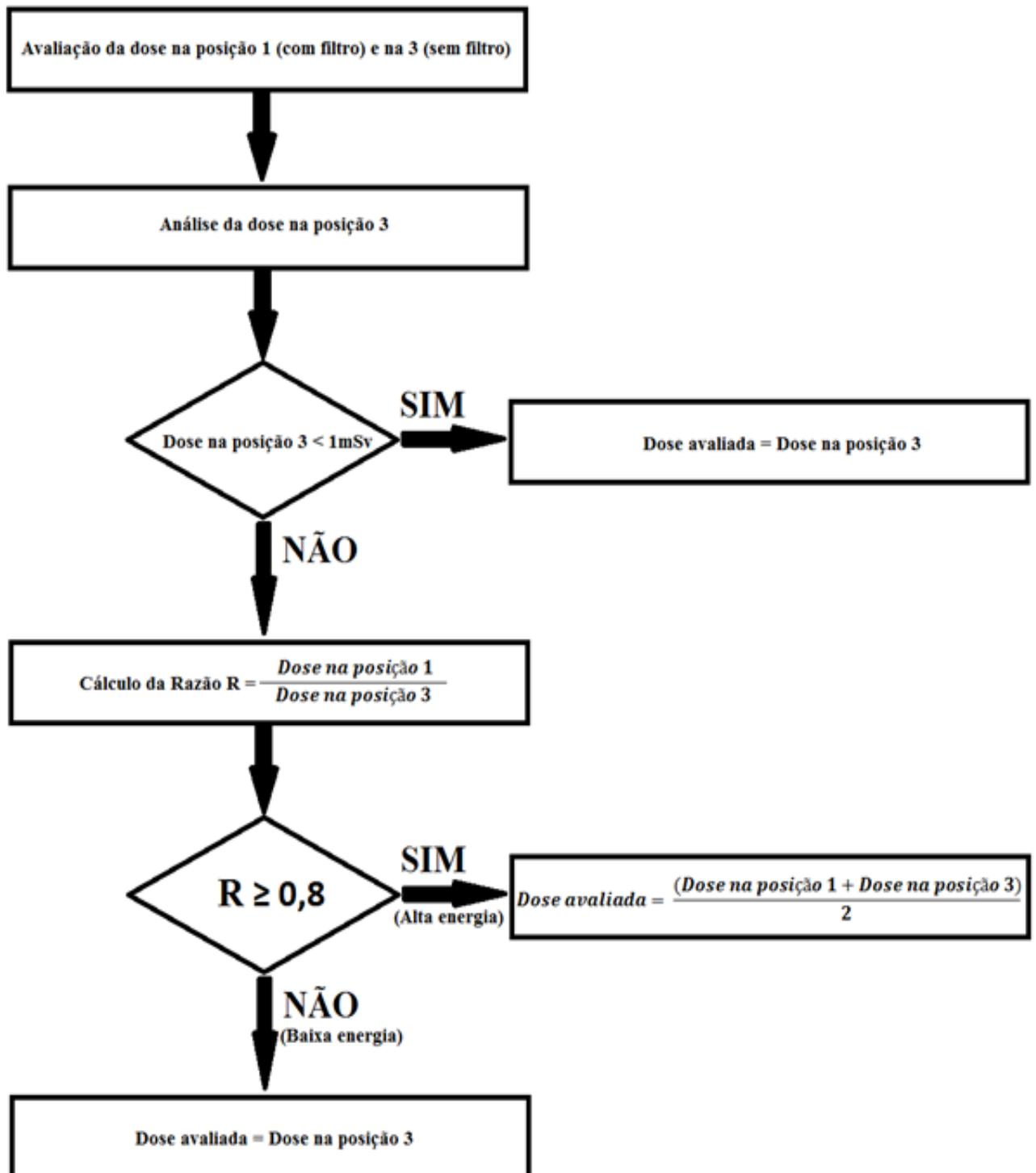


Figura 12: Algoritmo para avaliação das doses dos monitores individuais
 Fonte: DA SILVA. SMIE IRD, 2016

4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DOSIMÉTRICO

Para assegurar que um sistema de dosimetria TL atende critérios de exatidão e de precisão em suas medições, ensaios de caracterização e de desempenho devem ser realizados baseados em documentos de referência nacional ou internacional. Assim, para a implantação de um SMIE, é essencial o domínio dos objetivos, métodos e dos critérios de interpretação e aprovação dos ensaios descritos nesses documentos de referência. Antes de um sistema de dosimetria TL ser utilizado para prestação de serviço, estes ensaios necessitam ser realizados e os resultados validados pelo órgão competente do País.

A seguir são apresentados os ensaios descritos pela norma IEC 61066/2006, e os ensaios previstos no Regulamento Técnico do IRD-RT No. 002.02/2010. Apesar de defasado em relação ao que é estabelecido internacionalmente, o regulamento do IRD foi adotado como referência porque nele contém os testes que ainda estão em vigor no Brasil, específicos para sistemas de dosimetria TL e que foram julgados pertinentes a serem adotados em Países que ainda não possuem SMIES operantes. Em relação ao documento IEC 61066, apesar de já existir outra norma técnica mais atual, ela é específica para dosimetria TL, logo além dos parâmetros para os ensaios estarem mais bem especificados, permite uma melhor análise comparativa entre o que está descrito no Regulamento Técnico do IRD e o que já foi estabelecido internacionalmente. A norma mais atual é a IEC 62387/2012, que apresenta os ensaios de forma mais genérica, sem especificar a técnica dosimétrica, além de permitir uma maior flexibilidade nos parâmetros a serem adotados nos testes, de forma que esses possam ser adaptados para refletirem realidades específicas. Como esta é a norma vigente, os seus requisitos mais importantes estão apresentados nesse estudo.

4.1 Ensaios descritos na norma padronizada internacional – IES 61066

Os ensaios de caracterização e de desempenho para o sistema de dosimetria TL, descritos na norma IEC 61066 são descritos nesta seção.

4.1.1 Não linearidade

Este teste é realizado para assegurar a proporcionalidade entre a resposta TL e a dose absorvida pelo monitor individual. Para isso, deve-se preparar, irradiar e avaliar um grupo com 5 monitores individuais utilizando a fonte de ^{137}Cs ou ^{60}Co . Para a irradiação, são utilizados doze valores verdadeiros convencionais C_i , sendo que para os dois valores verdadeiros convencionais mais baixos, devem ser irradiados dois grupos. Adicionalmente, é irradiado mais um grupo na vizinhança de mudança de faixa (se conhecido). Quando o intervalo utilizado for de 1 mSv até 10 Sv, os valores devem ser multiplicados por um fator 10.

Na interpretação dos resultados, é calculado o valor avaliado médio \overline{E}_i para cada irradiação e o desvio padrão s_i .

Se para cada dose de valores verdadeiros convencionais C_i o critério de aceitação apresentado na equação 16 for válido, pode ser considerado que é observado o requisito de não linearidade.

$$0,91 \leq \left(\frac{\overline{E}_i}{\overline{E}_{r,0}} \mp U_{com} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C_i} \leq 1,11 \quad (16)$$

Onde: \overline{E}_i – média das leituras do grupo de todos grupos; $\overline{E}_{r,0}$ – média de valor na condição de referência. $C_{r,0}$ – dose de referência recebida. U_{com} – intervalo de confiança para 95%, obtido através da equação A2' (Anexo II); e $\frac{C_{r,0}}{C_i}$ é considerado desprezível (abaixo de 2%).

Durante a realização do ensaio os monitores devem ser irradiados no simulador de tronco da ISO (especificado na ISO) e na direção de referência.

4.1.2 Dependência energética e angular

A dificuldade na avaliação de dose que alguns sistemas de dosimetria possuem está na dependência energética e angular que o detector TL apresenta, sendo uma das principais fontes de incerteza do sistema dosimétrico. Por isso, é necessário que não só o detector TL, mas todo o sistema seja testado seguindo critérios que avaliam a sua dependência energética e angular. Esta será definida como adequada, para dosimetria de TL, através da avaliação da resposta do monitor previamente irradiado pela mesma dose em diferentes ângulos e energias.

Para este ensaio a IEC 61066 utiliza qualidades de radiação especificadas na ISO 4037 e estes estão apresentados na tabela 2:

Tabela 2: Qualidade de radiações (QR)

QR	N-15	N-20	N-30	N-40	N-60	N-80	N-100
Energia	12 keV	16 keV	24 keV	33 keV	48 keV	65 keV	83 keV
QR	N-150	N-200	N-300	S-Cs (¹³⁷ Cs)	S-Co(⁶⁰ Co)	R-C	R-F
Energia	118 keV	164 keV	250 keV	662 keV	1250 keV	4,4 MeV	6,7 MeV

Finte: ISO 4037

As Irradiações para o ensaio devem ser realizadas nas energias e ângulos de incidência apresentados na tabela 3:

Tabela 3: Energias e ângulos utilizados para a irradiação

α	Energias
0°	Para todas as qualidades de radiação.
60° e $\pm\alpha_{max}$	Para os três valores mais baixos de energias.
90°	Aplica-se a todas as qualidades de radiação, de acordo com o requisito 4.1.7.
$\pm(180^\circ - \alpha_{max})$	Quanto a α_{max} , não é necessário se o suporte do dosímetro é simétrico ou o uso contrário é impedido.
$\pm 120^\circ$	Quanto a 60° , não é necessário se o suporte do dosímetro é simétrico ou o uso contrário é impedido.
$\pm 180^\circ$	Quanto ao ângulo de incidência de 0° , não é necessário se o suporte do dosímetro é simétrico ou o uso contrário é impedido.

Fonte: IEC 61066

A avaliação é realizada através da equação 17, considerando a razão do valor médio das leituras (\bar{E}_i) de cada grupo pelo valor verdadeiro convencional ($\bar{E}_{r,0}$), num intervalo de confiança de 95% (U_{com}). Para a irradiação dos monitores individuais com todas as qualidades de energia e o ângulo de $\alpha - 180^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{max}$, é considerado que o requisito de aceitação do ensaio é atingido se o resultado estiver dentro intervalo apresentado na equação 17.

$$0,71 - U_{C,com} \leq \left(\frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_{r,0}} \mp U_{com} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C_i} \leq 1,67 + U_{C,com} \quad (17)$$

Onde: $U_{C,com}$ – intervalo de confiança para 95%, calculado de acordo com a equação A2” (Anexo II)

4.1.3 Influência da temperatura ambiente e umidade relativa

A resposta TL é influenciada pelas condições de ambiente em que o monitor individual se encontra, devido às características que o material TL possui. Sendo assim, deve-se verificar se a resposta TL do monitor, perante diversas condições de temperatura e umidade, atende aos requisitos estabelecidos para a utilização do mesmo na monitoração individual. Para isso, cinco grupos, contendo no mínimo 6 monitores individuais cada, devem ser irradiados e avaliados, utilizando uma fonte de referência. Estes grupos, após a irradiação, devem ser submetidos a seguintes condições, durante 48 horas:

- Grupo 1: monitores individuais expostos a -10°C de temperatura;
- Grupo 2: monitores individuais expostos a temperaturas de $+40^\circ\text{C}$ e 60% de umidade relativa (sem condensação);
- Grupo 3: monitores individuais expostos ao valor extremo baixo de temperatura da faixa de medição;
- Grupo 4: monitores individuais expostos ao valor extremo superior da temperatura e da umidade relativa (sem condensação) da faixa de medição;
- Grupo 5: grupo de referência: a temperatura e a umidade relativa devem ser às das condições padrões de teste;

Em casos que o tempo de medição máxima (t_{max}) do monitor individual for superior a 1 mês, os monitores devem ser expostos à grandeza de influência no seguinte tempo t , de acordo com a equação 18.

$$t = 48h \left[1 + \frac{t_{max} - 1 \text{ mês}}{3 \text{ meses}} \right] \quad (18)$$

Para a avaliação do resultado é calculado o valor avaliado médio \bar{E}_i para cada grupo e o desvio padrão s_i . No entanto, os requisitos de aceitação do ensaio são verificados perante o cumprimento da equação 19.

$$0,83 \leq \left(\frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_{sgrupos}} \pm U_{com} \right) \leq 1,25 \quad (19)$$

Onde $\bar{E}_{sgrupos}$ – média das leituras dos 5 grupos.

4.1.4 Efeito da luz sobre o monitor individual

A luz existente no local de armazenamento ou de utilização do monitor individual pode provocar o desvanecimento, fazendo com que a resposta TL a ser avaliada no respectivo monitor individual seja reduzida. Para verificação desse efeito e assegurar que a influência esteja dentro do limite aceitável, o ensaio da influência da luz deve ser realizado. Para isso, dois grupos com no mínimo 6 monitores individuais devem ser irradiados utilizando uma fonte de referência. Após a sua irradiação, estes são submetidos às seguintes condições:

- Grupo 1: os monitores individuais devem ser expostos ao valor extremo baixo da luz de exposição na faixa de medição em 48 h. Se o tempo de medição máximo (t_{max}) do monitores individuais é superior a 1 mês, os monitor individuais devem ser expostos à grandeza de influência no tempo $t = 48h \left[1 + \frac{t_{max} - 1 \text{ mês}}{3 \text{ meses}} \right]$.
- Grupo 2: grupo de referência: os monitor individuais devem ser mantidos na sombra, a luz do dia normal.

Para a luz de exposição do grupo 1, deve ser utilizada uma lâmpada que produz uma luz cujo espectro corresponde à da luz solar brilhante (295 nm a 769 nm).

Para a avaliação do resultado é calculado o valor avaliado médio \bar{E}_i para cada grupo e o desvio padrão s_i . Portanto, os resultados são considerados positivos quando a equação 20 é verificada.

$$0,91 \leq \left(\frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_{2grupos}} \pm U_{com} \right) \leq 1,11 \quad (20)$$

4.1.5 Influência de build up dose, desvanecimento, a auto-irradiação e de resposta à radiação natural sobre o monitor individual

Este teste objetiva assegurar que o monitor individual não seja influenciado por fatores que possam alterar a sua resposta TL. Para isso, são irradiados e avaliados cinco grupos de monitores individuais, utilizando uma fonte de referência, de acordo com a seguinte sequência:

- Grupos 1 a 3: com 6 monitores individuais cada, devem ser exposto a uma fonte de referência;
- Grupo 4: com 25 monitores, devem ser expostos a uma dose igual ao limite inferior da faixa de medição (*LID*);
- Grupo 5: com 25 monitores, não deve ser exposto a qualquer radiação.

Estes grupos, após a irradiação, são submetidos às seguintes condições:

- O grupo 1 deve ser lido 1 h após a irradiação, se não houver indicação do tempo de leitura pelo manual de instrução;
- O grupo 2 é grupo de referência, deve ser lido 1 semana depois da irradiação;
- Os grupos 3 e 4 devem ser lidos depois do tempo de medição máxima (t_{max}) após a irradiação;
- O grupo 5 devem ser lidos depois do tempo de medição máxima (t_{max});

- Os grupos 4 e 5 devem ser armazenados juntos a uma taxa de dose de radiação do fundo.

Um novo grupo de dosímetros (grupo 4') deve ser formado resultante da subtração de cada valor do grupo 4 com o valor médio das medições do grupo 5: $\{E_{j,4} - \bar{E}_5\}$, $j = 1..n_4$. Neste grupo 6 deve ser calculada média (\bar{E}'_4) e o desvio padrão S'_4 .

Para a avaliação dos resultados, deve ser calculado o valor avaliado médio \bar{E}_i em cada grupo e o desvio padrão s_i . Os resultados do ensaio são considerados positivos, quando as seguintes condições são observadas:

Para os grupos 1 e 3 as equações 21 e 22 devem ser cumpridas.

$$0,91 \leq \left(\frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_2} \pm U_{com} \right) \leq 1,11 \quad (21)$$

$$-0,09 \leq \left(\frac{1}{1,24} \cdot \frac{s_i}{\bar{E}_i} \right) \leq 0,11 \quad (22)$$

Para o grupo 4' é calculada a razão $\frac{1}{1,24} \cdot \frac{s'_i}{\bar{E}'_4}$ cujo resultado deve corresponder aproximadamente ao intervalo: 15% quando o equivalente de dose (H) for menor que 0,1mSv; 5% quando $H \geq 1,1\text{mSv}$ e $(16 - H/0,1\text{mSv})\%$ quando $0,1\text{mSv} \leq H \leq 1,1\text{mSv}$.

Para o grupo 5, a condição $-LID \leq \bar{E}_5 \pm U_m - C_{nat} \leq +LID$ deve ser verificada; onde: C_{nat} é o valor verdadeiro convencional da radiação natural durante o armazenamento do grupo 4 e 5.

4.1.6 Características de sobrecarga, efeitos posteriores e reutilização do monitor individual

Este teste possui o objetivo de assegurar que as propriedades de liberação da energia acumulada do material TL estejam adequadamente acauteladas. Para isso, é realizado este ensaio em três etapas:

- a. Reconhecimento de sobrecarga

Quando o monitor individual é irradiado com uma dose 10 vezes o limite superior de detecção ($10 \cdot H_{sup}$), o valor da dose avaliada não deve ser menor que H_{sup} e o sistema deve exibir uma mensagem de sobrecarga.

b. Efeitos posteriores

Se um monitor individual irradiado com alta dose produz efeitos posteriores em qualquer medição, medidas adequadas devem ser tomadas para assegurar que os requisitos da norma sejam atendidos nas medições.

c. Reutilização

Se o monitor individual não pode ser reutilizado ou se a usabilidade depende do histórico do monitor individual, este fato deve ser estabelecido pelo fabricante. Normalmente, uma alta dose exposta na última irradiação afeta a reutilização. Um monitor individual ainda considerado útil deve cumprir todos os requisitos demonstrados abaixo.

Para a realização deste ensaio devem ser preparados 4 grupos de monitor individual, irradiá-los em uma fonte de referência, e avaliá-los de acordo com o seguir:

- Grupo 1: grupo de referência, com mínimo de 5 monitores individuais utilizando dose de referência ($C_{r,0}$);
- Grupo 2: com 1 monitor individual, este deve ser irradiado em equivalente de dose a 10 vezes do valor do H_{sup} ;
- Grupo 3: com mínimo de 10 monitores individuais, estes devem ser irradiados em equivalente de dose igual ao LID;
- Grupo 4: com mínimo de 10 monitores individuais, estes devem ser irradiados com uma dose que permite a sua reutilização, fornecida pelo fabricante. Em seguida realize o recozimento para uma nova irradiação em equivalente de dose igual ao LID.

Os monitores individuais devem ser lidos na ordem. O valor avaliado do segundo grupo deve ser pelo menos o limite superior da faixa de medição ou o sistema deve apresentar uma mensagem de sobrecarga.

Para os três outros grupos, o resultado obtido deve estar de acordo com a equação 23.

$$0,91 \leq \left(\frac{\bar{E}_i}{E_{r,0}} \mp U_{com} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C_i} \leq 1,11 \quad (23)$$

4.1.7 Incidência do ângulo de irradiação sobre o monitor individual

Sendo o monitor individual irradiado no ângulo diferente da referência, o valor da dose avaliada não deve exceder 1,2 vezes ao valor da mesma dose na mesma qualidade de radiação e no ângulo de referência (0°).

Para este ensaio, são preparados dois grupos de monitor individual e irradiados em equivalente de dose ambiente (H*(10)) de acordo com a sequência que se segue:

- Grupo 1: os monitores individuais devem ser irradiados no ângulo de incidência de 0°.
- Grupo 2: os monitores individuais devem ser irradiados com ângulos de incidência variados. O dosímetro deve ser rotado em torno da direção de referência, ou seja, o ângulo zero. Caso não seja possível realizar a rotação, devem ser realizadas irradiações em outros ângulos de incidência.

A equação 42 é utilizada para avaliar a aceitação do ensaio, onde o resultado tem de estar abaixo do valor indicado na equação.

$$\frac{\bar{E}_{\alpha_{max}} \alpha 180^\circ - \alpha_{max}}{\bar{E}_{0^\circ}} + U_{com} \leq 1,2 \quad (24)$$

4.1.8 Requisitos de desempenho mecânico

O monitor individual pode estar sujeito a diferentes condições de utilização que podem afetar o seu estado físico. Para evitar que isso influencie

na resposta TL deve ser realizado o presente ensaio no intuito de verificar a robustez do monitor individual.

Sendo assim, o valor absoluto do desvio devido a perturbações mecânicas não devem exceder $0,7 \cdot LID$ para cada grandeza de influência. E se o desvio exceder o limite permitido, o sistema deve apresenta uma mensagem de erro e interromper a leitura automaticamente.

A soma geométrica dos desvios devido a todas as perturbações eletromagnéticas não deve exceder $1,1 \cdot LID$. Após a influência das perturbações mecânicas sobre o monitor individual, este não deve apresentar danificações internas e externas. E a soma geométrica dos desvios devido a todos os distúrbios mecânicos não deve exceder $0,8 \cdot LID$. Para isso, são analisados dois critérios:

- Critério 1: resistência a impactos do monitor individual;
- Critério 2: vibração do monitor individual e do leitor.

a. Resistência a impactos do monitor individual

Para este critério, preparam-se dois grupos de monitores individuais e irradia-os utilizando uma fonte de referência em equivalente de dose de $7 \cdot LID$.

A avaliação é realizada de acordo com a seguinte sequência:

- Grupo 1: cada monitor individual deve ser submetido a um teste de queda em cada uma dos 6 faces do monitor individual;
- Grupo 2: grupo de referência.

Após a avaliação, os resultados obtidos devem estar de acordo com a equação 25.

$$|\bar{E}_1 - \bar{E}_2 \pm U_m| \leq 0,7 \cdot LID \quad (25)$$

Onde \bar{E}_1 – média das leituras do grupo 1, \bar{E}_2 – média das leituras do grupo 2, U_m – intervalo de confiança para 95%.

b. Vibração do monitor individual e do leitor (com peso menor que 15 kg)

Nesta etapa, irradiam-se três grupos de monitores individuais, utilizando uma fonte de referência, a uma dose equivalente de $7 \cdot LID$, de acordo com a seguinte sequência:

- Grupo 1: os monitores individuais devem ser montados em cada uma das três direções ortogonais, para cada direção um terço do monitores do grupo 1 devem ser utilizados sobre uma placa. Eles devem ser vibrados com um deslocamento sinusoidal na direção vertical durante 15 minutos na frequência de 50 Hz e com uma amplitude máxima de 1 mm.
- Grupo 2: os monitores individuais devem ser lidos quando o leitor estiver sujeito às mesmas condições mencionadas no grupo 1.

Após a leitura, é utilizada a equação 26 para verificar se os resultados estão dentro dos limites permitidos.

$$|\bar{E}_1 - \bar{E}_2 \pm U_m| \leq 0,7 \cdot LID \quad (26)$$

Onde: \bar{E}_1 – média das leituras do grupo 1, \bar{E}_2 – média das leituras do grupo 2.

Então, tendo os dois critérios para aceitação com resultados adequados, o ensaio pode ser considerado atingido.

4.2 Ensaios descritos no regulamento técnico do IRD – IRD-RT No. 002.02/2010

Os ensaios de caracterização e de desempenho para o sistema de dosimetria TL, descritos no Regulamento Técnico do IRD No. 002.02/2010 são descritos a seguir.

4.2.1 Homogeneidade do lote

Os materiais TL apresentam sensibilidades diferentes verificadas após a sua fabricação. Sendo assim, para que um lote seja formado e a resposta dos monitores individuais que o compõe seja idêntica, é necessário verificar a sensibilidade de todos os monitores individuais do lote. Para isso, um grupo de monitores individuais deve ser irradiado com o mesmo valor verdadeiro convencional C igual a 2 mGy. Em seguida, deve-se determinar o valor avaliado E para cada monitor. Deve ser identificado o monitor com o máximo e mínimo valor avaliado, E_{max} e E_{min} , respectivamente. Para aceitação do ensaio, a condição 27 deve ser verificada nos resultados obtidos:

$$\frac{E_{max} - E_{min}}{E_{min}} \leq 0,3 \quad (27)$$

4.2.2 Reprodutibilidade

Este ensaio é realizado para assegurar que o sistema dosimétrico apresente sempre a mesma resposta quando este é irradiado com a uma mesma dose. No entanto, para a verificação desse efeito, um grupo de monitores individuais deve ser irradiado e avaliado utilizando o valor verdadeiro convencional igual a 10 mGy. Este procedimento deve ser repetido por dez vezes usando o mesmo valor verdadeiro convencional. Para a avaliação do resultado, deve-se determinar E_{ij} para cada monitor, sendo i a i -ésima irradiação e j o j -ésimo monitor. De seguida, deve-se calcular o \bar{E}_i para cada uma das dez irradiações e o desvio padrão s_i , de acordo com as expressões 28 e 29.

$$\bar{E}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (28)$$

$$\frac{s_i + U_i}{\sum_{i=1}^{10} \bar{E}_i} \leq 0,075 \quad (29)$$

Por fim, deve ser determinado, para cada um dos monitores individuais, a média \bar{E}_j (equação 30) e o desvio padrão s_j . Para a aprovação do ensaio, o critério da equação 31 deve ser cumprido.

$$\bar{E}_j = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} A_{ij} \quad (30)$$

$$\frac{s_j + U_j}{\bar{E}_j} \leq 0,075 \quad (31)$$

Onde: U_j é intervalo de confiança de s_j , e obtido de acordo com a equação A.3. (Anexo II).

4.2.3 Linearidade

Para o ensaio de linearidade, é irradiado e avaliado um grupo de monitores individuais utilizando os seguintes valores verdadeiros convencionais C_i : 0,2 mGy, 1 mGy, 10 mGy 100 mGy e 1 Gy. Após a irradiação, deve-se calcular a média do valor avaliado \bar{E}_i e o desvio padrão S_i para cada irradiação, e demonstrar o cumprimento das condições apresentadas na equação 32.

$$0,90 \leq \frac{\bar{E}_i + U_m}{C_i} \leq 1,10 \quad (32)$$

4.2.4 Limite inferior de detecção

Para garantir que o sistema dosimétrico possa avaliar doses abaixo do nível de registro, deve ser realizado o ensaio para determinar o Limite Inferior de Detecção. Para isso, um grupo de monitores individuais não irradiados deve ser preparado e avaliado. Em seguida, deve-se determinar o valor avaliado E para cada monitor e calculada a sua média \bar{E} e o desvio padrão da média $s_{\bar{A}}$ para todos os monitores. O resultado obtido deve estar dentro da exigência da equação 33.

$$t_n \cdot s_{\bar{A}} \leq LID \quad (33)$$

Onde t_n é o t Student para n-1 graus de liberdade (n=número do monitor individual utilizado no teste) a um nível de confiança de 95%. Tabela A1 do Anexo II apresenta os valores de t_n .

4.2.5 Auto-irradiação

Um grupo com n monitores individuais deve ser armazenado durante 30 dias em um local com a taxa de radiação de fundo conhecida e sob condições padrão do teste.

Este grupo deve ser avaliado determinando o valor E , calculando a média do valor avaliado \bar{E} para todos os monitores e o desvio padrão. Sendo assim, deve ser demonstrada a condição 34.

$$(\bar{E} + U_m)C_b \leq LID \quad (34)$$

Onde: C_b é o valor verdadeiro convencional devido a radiação do fundo.

4.2.6 Estabilidade dos monitores individuais sob diferentes condições climáticas

Este ensaio é realizado em quatro etapas descritas a seguir:

- Etapa 1: dois grupos de monitores individuais devem ser armazenados por 24 horas sob condições padrões. Em seguida, é irradiado o grupo 1 utilizando o valor verdadeiro convencional C_i igual a 10 mGy e são armazenados os dois grupos nas mesmas condições padrões de teste por um período de 30 dias. Após este período, o grupo 2 é irradiado com o mesmo valor verdadeiro convencional C_i igual ao do grupo 1, e são armazenados os dois grupos por um período de 24 horas em condições padrões do ensaio. Por fim, é determinado o valor avaliado E para cada monitor e calculada a média \bar{E} e o desvio padrão para cada grupo. Os resultados devem estar de acordo com os critérios apresentados na equação 35.

$$0,90 \leq \frac{\bar{E}_i + U_m}{c_i} \leq 1,10 \quad (35)$$

- Etapa 2: Deve-se repetir os métodos descritos na etapa 1, porém o tempo de armazenamento deverá ser de 90 dias ao invés de 30. Nesta condição, a equação 36 deve ser verificada.

$$0,85 \leq \frac{\bar{E}_i + U_m}{c_i} \leq 1,15 \quad (36)$$

- Etapa 3: Deve-se repetir os métodos descritos na etapa 1, porém as condições de armazenamento dos monitores individuais devem ser as seguintes:

- temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (deve-se usar uma câmara climática)
- umidade relativa em valores normais das condições de armazenamento dos monitores no laboratório;
- período de armazenamento de 7 dias.

Em seguida, deve ser demonstrado que para cada grupo, as condições apresentadas na equação 37 são verificadas.

$$0,80 \leq \frac{\bar{E}_i + U_m}{c_i} \leq 1,20 \quad (37)$$

- Etapa 4: Deve-se repetir os métodos descritos na etapa 1, porém agora utilizando uma câmara de climática com a temperatura ambiente (aproximadamente a 25°C) e umidade relativa de 90 %. O tempo de armazenamento deve ser de 30 dias. Por fim, os resultados obtidos, devem pertencer ao intervalo apresentado pela equação 38.

$$0,80 \leq \frac{\bar{E}_i + U_m}{c_i} \leq 1,20 \quad (38)$$

4.2.7 Sinal residual

Este ensaio verifica o efeito do sinal residual no limite inferior de detecção e na resposta do monitor individual.

- a) Efeito no limite de detecção: são irradiados e avaliados os mesmos monitores individuais utilizado no ensaio para avaliar o limite inferior de detecção, com um valor verdadeiro convencional aproximadamente de 100 mGy. Em seguida, é repetido o ensaio de limite inferior de detecção.
- b) Efeito na resposta: neste ensaio é utilizado o mesmo grupo de monitores individuais do teste a), irradiados e avaliados com um valor verdadeiro convencional de aproximadamente de 2 mGy. Perante isso, deve ser determinado o valor avaliado E para cada monitor, calculado a média \bar{E} e o desvio padrão s . Os resultados obtidos devem estar contidos no intervalo apresentado pela equação 39.

$$0,90 \leq \frac{\bar{E}_i + U_m}{c_i} \leq 1,10 \quad (39)$$

4.2.8 Efeito da luz sobre o monitor individual

Este ensaio é realizado para duas condições do monitor individual: antes e depois da irradiação.

- a) Antes da irradiação (leitura zero) são utilizados dois grupos de monitores individuais e submetidos às seguintes condições:
- No Grupo 1, os monitores devem ser expostos durante 24 horas, a uma luz de 4 lâmpadas fluorescentes de 40 W, na distância de 1 m com a temperatura dos monitores inferior a 40°C. E o grupo 2, os monitores individuais devem ser armazenados em um local escuro, com condições de ambiente idênticas as do grupo 1, e sem que a temperatura dos monitores, em relação ao grupo 1, varie em mais de 5%. Após isso, é realizada a avaliação, depois de 1 dia, e determinado o valor avaliado E de cada monitor. A média dos valores avaliados \bar{E} para cada grupo e o respectivo desvio padrão s devem ser calculados, e com isso, os critérios da equação 40 devem ser verificados.

$$|\bar{E}_1 \bar{E}_2 + U_s| \leq LID \quad (40)$$

b) Após a irradiação (efeito na resposta): devem ser irradiados dois grupos de monitores individuais com o valor verdadeiro convencional de 10 mGy, e realizado o ensaio a) para os dois grupos. Após uma semana, é efetuada a avaliação do valor avaliado E de cada monitor, e calculada as médias \bar{E}_i para cada grupo e o respectivo desvio padrão s . Nestes termos, os resultados obtidos devem estar de acordo com a equação 41.

$$0,90 \leq \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} + U_s \leq 1,10 \quad (41)$$

4.2.9 Dependência energética

Neste ensaio, quatro grupos de monitores individuais devem ser irradiados e avaliados, utilizando um feixe estreito com valor verdadeiro convencional C igual a 10 mGy, nas seguintes energias:

- Grupo 1: a uma radiação no intervalo de 20 - 25 keV;
- Grupo 2: a uma radiação no intervalo de 30 - 40 keV;
- Grupo 3: a uma radiação no intervalo de 80 - 100 keV;
- Grupo 4: irradiação com as fontes ^{137}Cs ou ^{60}Co .

Em seguida deve ser determinado o valor avaliado E de cada monitor individual, e calculada a média dos valores avaliados \bar{E}_i , e o desvio padrão dos quatro grupos. Para a aceitação dos resultados obtidos, os critérios da equação 42 devem ser verificados.

$$0,7 \leq \frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_4} \pm U_i \leq 1,3 \quad (42)$$

Onde: i corresponde ao valor do grupo 1, 2 e 3 respectivamente. U_i é obtido de acordo com A.3 (Anexo II).

4.2.10 Dependência angular

Utilizando um valor verdadeiro convencional C igual a 10 mGy e um espectro de energia aproximadamente 60 keV, devem ser irradiados quatro

grupos de monitores individuais para a realização deste ensaio. Esta irradiação deve ser feita com ângulos de incidência situados nos quatro semi-planos formados por dois planos perpendiculares ao plano do monitor, e estes devem ser perpendiculares entre si e interceptados na normal ao monitor, de acordo com a seguinte sequência:

- Grupo 1: incidência normal (0°);
- Grupo 2: 20° em relação à normal, utilizando 4 monitores individuais;
- Grupo 3: 40° em relação à normal, utilizando 4 monitores individuais;
- Grupo 4: 60° em relação à normal, utilizando 4 monitores individuais.

Em seguida, deve ser determinado o valor avaliado E de cada monitor, e calculada a média dos valores avaliados \bar{E}_i e o desvio padrão para cada um dos quatro grupos. Assim sendo, a equação 43 deve ser verificada.

$$0,85 \leq \frac{\sum_{i=1}^4 \bar{E}_i}{4\bar{E}_1} \pm U_i \leq 1,15 \quad (43)$$

Onde: i corresponde ao valor do grupo 1, 2, 3 e 4 respectivamente. U_i é obtido de acordo com A.3 (Anexo II).

4.2.11 Influência da presença de um simulador

Este ensaio objetiva a verificação do comportamento da resposta TL quando o monitor individual é irradiado sobre um simulador. Para isso, é irradiado um grupo de monitores individuais, utilizando um valor verdadeiro convencional C igual a 10 mGy com um feixe frontal (0°) de energia efetiva de aproximadamente de 60 keV. Em seguida, o valor avaliado E de cada monitor individual deve ser determinado e calculada a média dos valores avaliados \bar{E}_i e o desvio padrão. Os resultados a serem obtidos devem estar de acordo com a equação 44.

$$0,7 \leq \frac{\bar{E} \pm U_m}{C} \leq 1,3 \quad (44)$$

4.2.12 Influência da irradiação pósterio-anterior

Este ensaio é realizado irradiando dois grupos de monitores individuais sobre um simulador, utilizando radiação gama emitida por uma fonte de ^{137}Cs ou ^{60}Co , na seguinte sequência:

- Grupo 1: irradiação a uma distância fixa da fonte com uma dose de 10 mGy;
- Grupo 2: irradiação na mesma posição do grupo 1 e a dose igual a 10 mGy, com ângulos de incidência variáveis, girando em torno de 180° .

Em seguida, deve ser calculada a média das respostas em termos de grandezas de calibração, separando os monitores individuais que foram irradiados frontalmente e os irradiados na parte posterior, e comparar o resultado das médias.

4.2.13 Resistência a impactos

Para este ensaio, um grupo de monitores individuais deve ser submetido ao teste de queda a uma distância de um metro e meio sobre uma superfície de concreto. Este procedimento deve ser repetido dez vezes. No final, é realizada a avaliação física para verificar o estado do monitor.

5. METODOLOGIA

Para a identificação e descrição dos critérios técnicos a serem seguidos por um SMIE, foi realizada uma revisão bibliográfica baseada em literaturas específicas da área de dosimetria, especialmente em documentos normativos que abordam aspectos operacionais, requisitos técnicos, de qualidade e de desempenho de um sistema dosimétrico.

Os regulamentos técnicos do IRD foram o ponto de partida para o estabelecimento dos requisitos básicos a serem atendidos, especialmente para a técnica de dosimetria TL. A partir deles, foi realizada uma análise crítica para a identificação dos critérios a serem adotados em um País que vise estabelecer as diretrizes para a implantação de serviços de monitoração em seu território. Além desses regulamentos, a revisão bibliográfica abrangeu documentos internacionais de relevância na área, especialmente normas e relatórios técnicos.

Ainda na etapa de revisão bibliográfica, foram identificados os ensaios de caracterização e de desempenho que devem ser realizados pelos laboratórios de dosimetria como forma de caracterizar e avaliar o sistema dosimétrico, permitindo a comprovação, perante órgãos reguladores e fiscalizadores, que este atende os critérios básicos de desempenho. Como forma de permitir um melhor embasamento dos referidos ensaios, parte daqueles mais importantes, que são descritos nas normas técnicas, foram reproduzidos na prática. Foi também incluída nesta etapa, a descrição dos critérios de aceitação e a metodologia de execução dos ensaios apresentadas nas Normas Internacionais e no Regulamento Técnico vigente no Brasil que tratam especificamente de ensaios de caracterização e de desempenho de sistemas dosimétricos passivos, destacando quais ensaios impactam fortemente nos resultados.

Para o estudo do Programa de Acompanhamento promovido pelo CASEC no Brasil, foi efetuado um levantamento dos resultados do programa para todos os SMIE brasileiro no período de 2010 a 2015. A partir da análise desses dados, foi utilizada principalmente a curva trombeta como ferramenta

de avaliação dos desempenhos, além de gráficos de caráter estatístico para permitir a extração de informações relevantes e que possam fundamentar conclusões e recomendações para melhorias. Os resultados dessa análise foram organizados e estão apresentados neste trabalho.

Nas subseções a seguir, são descritos de forma específica os métodos utilizados para a obtenção dos principais resultados desse trabalho.

5.1 Requisitos técnicos para implantação de um serviço de monitoração individual

Nesta etapa foram analisados os requisitos técnicos definido no Regulamento Técnico do IRD denominado “Critérios Gerais para Certificação de um SMIE” (IRD, RT N° 001.01, 1995), especialmente aqueles que tratam de dosimetria termoluminescente. Também, foram estudadas as recomendações técnicas da Comissão Europeia para monitoração individual de exposição ocupacional externa (GARCIA et al, 2009) e os critérios de sistema dosimétrico estabelecidos na norma IEC 61066 (IEC, 61066, 2006). Combinando estes documentos foi possível estabelecer critérios técnicos básicos a serem seguidos por um SMIE.

Através de atividades práticas realizadas no Laboratório de Dosimetria de Fótons do IRD (LDF/IRD), procedimentos operacionais foram efetuados para embasar a definição e melhor descrição de requisitos técnicos mais específicos. Foram executados os seguintes procedimentos juntamente com o responsável técnico do laboratório:

- formação de lote de TLD
- tratamento térmico de TLD;
- montagem e desmontagem de monitores individuais;
- irradiação de monitor individual;
- avaliação de monitor individual;
- testes de controle de qualidade.

Para a execução dos procedimentos técnicos supracitados, foi estudada a documentação técnica do LDF/IRD, inserida em seu sistema da qualidade, cujo conteúdo não só embasou as atividades práticas, mas também possibilitou uma melhor descrição dos critérios técnicos estabelecidos neste trabalho.

Reunindo todo o conhecimento obtido através da etapa de revisão bibliográfica e de realização de atividades práticas, foi possível apresentar como um dos resultados desse trabalho, a definição dos critérios técnicos a serem seguidos para a implantação e operacionalização de um novo laboratório de dosimetria TL. Tais critérios estão apresentados na forma de procedimentos técnicos que devem ser elaborados e executados, abrangendo as diversas etapas necessárias para a avaliação de doses externas.

5.2 Ensaios de caracterização e de desempenho essenciais para um sistema de dosimetria

Como forma de identificar, entender e descrever os diversos ensaios de caracterização e de desempenho de um sistema de dosimetria TL, foi estudado o Regulamento Técnico do IRD denominado “Desempenho de sistemas de monitoração individual - critérios e condições”, que estabelece os ensaios a serem executados para sistema dosimétrico, e duas normas da International Standard, IEC 62387 (IEC, 62387, 2012) e International Standard, IEC 61066 (IEC, 62387, 2006).

Os ensaios foram sumarizados e apresentados em uma única tabela, reunidos de acordo com a característica testada. A partir do estudo supracitado, buscou-se identificar e descrever os ensaios que mais impactam não só nos resultados, mas também na interpretação desses, tornando-se assim indispensáveis para a operação de um sistema de dosimetria TL.

5.3 Análise de desempenho dos SMIEs do Brasil

As análises realizadas para verificar o desempenho dos Sistemas de Monitoração Individual Externa (SMIE) para H_x do Brasil, no período de 2010 a 2015, foram efetuadas utilizando o critério de aprovação do programa de

acompanhamento de SMIE sobre o desempenho do sistema de avaliação de doses do CASEC/IRD. Este critério classifica uma aprovação quando o desempenho do SMIE está no mínimo em 90% ($D \geq 90\%$). E para que esta condição seja verificada, 90% dos valores avaliados devem encontrar-se dentro da faixa de incertezas aceitáveis na monitoração individual (dose na região próxima ao limite do valor verdadeiro e dose na região do nível de registro). Quando não se verifica a condição acima referida, o SMIE é classificado como reprovado.

Para a análise de desempenho de onze SMIE do Brasil, foram coletados dados no CASEC das avaliações mensais de cada SMIE. Através destes dados foi utilizada a curva trombeta como método para obtenção da análise de desempenho dos onze SMIE do Brasil.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho permitiu a obtenção de três resultados importantes:

1) A identificação, definição e descrição dos requisitos técnicos a serem adotados por um novo SMIE para iniciar a prestação de serviço, que são apresentados na forma de procedimentos técnicos que devem ser elaborados e executados (tabela 4);

2) Descrição de ensaios de caracterização e de desempenho baseada em três documentos de referência, conforme já explicitado neste trabalho (tabela 5); e identificação de ensaios de caracterização e de desempenho de um novo sistema de dosimetria TL (tabela 6);

3) Análise do desempenho de todos os SMIEs brasileiros submetidos ao programa de acompanhamento de desempenho do CASEC (tabelas 7 e 8).

6.1 Requisitos técnicos para implantação de um serviço de monitoração individual

Os requisitos técnicos pertinentes para implantação de um sistema de monitoração individual são apresentados na tabela 4. A análise desta tabela revela que diversos procedimentos devem ser elaborados e executados para a implantação de um SMIE, o que indica a complexidade envolvida nesse tipo de serviço. Desses procedimentos, alguns estão relacionados a processos que podem impactar fortemente no resultado da avaliação, logo podem ser considerados mais importantes. Entre esses se destacam: a avaliação dos monitores individuais; a calibração do sistema; processo de formação de lotes; tratamento térmico dos TLD; e implantação do algoritmo de cálculo de doses. Os procedimentos devem conter de forma clara como deve ser executado cada processo a qual está relacionado, de tal forma que as ações possam ser reproduzidas, permitindo uma maior confiabilidade nos resultados.

Um laboratório de dosimetria TL pode se basear no conteúdo apresentado na tabela 4 para definir os requisitos técnicos mínimos que devem ser contemplados para a prestação do serviço de monitoração individual. Ao apresentar esses requisitos na forma de procedimentos, este trabalho pode

servir como guia para que um novo laboratório conheça quais processos devem ser implementados e defina como eles devem ser realizados na rotina.

Tabela 4: Procedimentos para atendimento às exigências do regulamento técnico de um SMIE

Procedimentos necessários	Documento(s) de referência e Item	Descrição	Justificativa
Guia sobre descrição das atividades técnicas de rotina do laboratório.	RT do IRD (RT 001.02-2010) - CASEC.	Estabelece os procedimentos funcionais para avaliação da dose individual.	Necessidade de descrever todo o ensaio, elaborando uma espécie de documento mestre que estabelece as relações entre os demais.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – 8.2.		
Avaliação de monitor individual	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 7.	Descreve os procedimentos para a avaliação do monitor individual	Garantir a reprodutibilidade da sistemática de avaliação.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 - Item 8.2.		
Relatórios de dose	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 10 t).	Descreve os procedimentos para a emissão do relatório de doses individuais.	Necessidade de estar bem definido o passo-a-passo para emissão de relatórios de doses.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Item 9.		
Orientação para a irradiação de monitor individual	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 6.3 o).	Descreve os procedimentos necessários para realizar a irradiação do monitor individual utilizando fontes de radiação estabelecidas por norma.	Necessidade de garantir que as irradiações realizadas pelo próprio SMIE sejam padronizadas.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Itens 8.2; 8.5.		
Sistema de calibração	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 9 d) e e).	Descreve os procedimentos para a calibração do sistema dosimétrico em um laboratório com rastreabilidade metrológica.	Necessidade de estabelecer uma sistemática padrão para a calibração do sistema, de tal forma que seja garantida a rastreabilidade das medições.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 - Itens 7; 10.5.3.		
Critérios para montagem e desmontagem do monitor	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Itens 5 e 6.1.	Descreve os procedimentos para montar e desmontar do monitor durante a sua preparação.	Definir instruções a serem executadas para a montagem e desmontagem correta dos monitores, evitando possíveis danos ou comprometimento dos resultados.

Tabela 4: Procedimentos para atendimento às exigências do regulamento técnico de um SMIE (continuação)

Procedimentos necessários	Documento(s) de referência e Item	Descrição	Justificativa
Segurança das instalações e condições ambientais do local	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 3.2.	Estabelece condições para o controle de acesso e condições ambientais adequadas no local utilizada para a realização de avaliação de dose.	Importância em garantir a segurança do ensaio através do controle de acesso de pessoas e das condições ambientais, que podem influenciar os resultados das medidas.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Item 10.5.2;		
Garantia da qualidade do sistema dosimétrico: estabilidade, verificação da exatidão da resposta TL e do envelhecimento do lote.	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 6.3 l) e p).	Estabelece o programa de controle de qualidade do sistema dosimétrico para verificar a estabilidade, reprodutibilidade e exatidão de todos os processos.	Definir os materiais e métodos a serem utilizados para a realização de testes de controle de qualidade, como forma de garantir a exatidão e precisão dos resultados.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Item 8.2; 10.		
Formação de lotes de TLD	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 6.3 m).	Estabelece os procedimentos para formação de lotes.	Necessidade de garantir que os TLD do mesmo lote respondem estatisticamente iguais, logo é importante padronizar o método de formação do lote e os critérios adotados.
Tratamento térmico dos TLD	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 6.3 g).	Estabelece o método para o tratamento térmico dos cristais.	Devido ao forte impacto que os tratamentos térmicos podem exercer sobre os resultados, é importante a definição dos parâmetros de tempo e temperatura dos tratamentos que devem ser realizados, bem como prever os requisitos para que cada tratamento seja realizado.
Guia de funcionamento dos equipamentos e de toda instrumentação do sistema.	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Itens 6.3 c) e 8 f)	Fornece instruções funcionais a serem utilizadas nos equipamentos principais do sistema, bem como a sua instrumentação complementar.	Necessidade de que os operadores tenham instruções para que as funções dos instrumentos possam ser plenamente e corretamente utilizadas
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Item 10.5.4.		

Tabela 4: Procedimentos para atendimento às exigências do regulamento técnico de um SMIE (continuação)

Procedimentos necessários	Documento(s) de referência e Item	Descrição	Justificativa
Algoritmo para cálculo de dose	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 7.	Descreve o algoritmo de avaliação do valor indicado para a obtenção da dose reportada.	Existe uma necessidade de definir e documentar todos os métodos para cálculo da dose.
	International Standards IEC 610066 – Item 8.6.		
Características físicas dosimétricas do cristal TL e do sistema.	RT do CASEC (RT 001.02-2010) – Item 7.	Descreve as características físicas e dosimétricas do monitor individual e do sistema, incluindo a faixa de medição.	É importante que todas as características físicas e dosimétricas do sistema sejam descritas para que as particularidades do sistema que possam impactar na avaliação sejam bem conhecidas.
	International Standards IEC 61066 – Item 8.4.		
Programa de manutenção, calibração e avaliação dos equipamentos.	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 8 h) e e).	Descreve os critérios e procedimentos para manutenção, calibração, avaliação periódica dos equipamentos e instrumentos utilizados no laboratório.	Este procedimento deve ser estabelecido para garantir principalmente que manutenções periódicas sejam realizadas evitando interrupções no serviço prestado; para garantir uma sistemática de pronta correção de defeitos; e que todo o sistema esteja com a calibração em dia.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Item 8.4.		
A comunicação especial dos resultados.	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 11.	Descreve os procedimentos para a comunicação periódica e comunicação em casos excepcionais especificados na norma, sobre doses dos trabalhadores aos clientes e à Autoridade Reguladora.	Como alguns resultados estão em faixa de doses em que comunicação especial para o cliente e para a autoridade reguladora é requerido procedimento que defina esses valores de doses e os prazos para comunicação.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Itens 9.5.3; 10.5.9.		
O sistema de gestão, registros de dados, e relatório.	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 10.	Descreve o sistema de base de dados do laboratório, perante o armazenamento da informação e sua gestão.	Garantir o eficiente mecanismo de registro e recuperação de dados.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Item 9.		

Tabela 4: Procedimentos para atendimento às exigências do regulamento técnico de um SMIE (continuação)

Procedimentos necessários	Documento(s) de referência e Item	Descrição	Justificativa
Guia de manuseio e armazenamento dos Cristais TL e monitores	RT do IRD (RT 001.02-2010) – Item 6.1.	Estabelece critérios para armazenamento e manuseio adequado dos cristais TL e os monitores antes de sete serem utilizados	Necessidade de manuseio correto dos TLD e dos monitores, evitando possíveis danos ou comprometimento dos resultados.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – 10.5.7.		
Ações a executar perante um monitor individual exposto a altas doses	RT do CASEC (RT 001.02-2010) – Item 6.3 h)	Estabelece os procedimentos aplicados perante o monitor individual exposto a altas doses: separação e tratamento.	Necessidade de definir a partir de qual o valor de dose o monitor individual precisa ser separado e quais ações devem ser executadas.
	Recomendações da Comissão Europeia N° 160 – Itens 8.2; 9.5.3		
Desuso ou conserto monitor.	RT do CASEC (RT 001.02-2010) – Item 6.1.	Estabelece os critérios e procedimentos para descarte e conserto do monitor individual o monitor	Necessidade de definir os critérios para que um monitor seja considerado defeituoso em definitivo ou que ainda possa ser utilizado após reparos. É necessários definir quais reparos poderão ser realizados.
	International Standards IEC 61066 – Item 7.5.		

6.2 Ensaio de caracterização e de desempenho essenciais para um sistema de dosimetria

A tabela 6 descreve os ensaios de caracterização e de desempenho de um sistema de dosimetria TL, considerando os documentos de referência já indicados neste trabalho. Esta descrição permitiu verificar que as normas internacionais IECs não preveem alguns testes que previstos no Regulamento Técnico vigente no Brasil (IRD-RT No. 002.02/2010), especialmente a homogeneidade do lote e reprodutibilidade. No entanto, as normas internacionais contemplam ensaios que ou não são requeridos no RT-IRD ou apresentam requisitos muito distintos. Pôde-se observar que o maior número de ensaios possui semelhança nos métodos de execução dos mesmos, sendo distintos nos critérios de aceitação exigidos para cada documento.

Na análise dos ensaios de desempenho, foram também confrontados os critérios de aceitação dos ensaios descritos nas normas IEC12066 e IEC62387. Constatou-se que, para a maior parte dos ensaios, as duas normas consideram o mesmo critério de aceitação e para aqueles cujos critérios de aceitação são distintos, as suas diferenças são consideravelmente menores, como se podem verificar na tabela 5, referente aos testes de linearidade e incidência do ângulo de irradiação sobre o monitor individual. A norma IEC62387 não prevê a realização do teste de vibração.

Os ensaios de caracterização e de desempenho pertinentes para um novo sistema de dosimetria TL são apresentados na tabela 6. Estes foram destacados devido ao fato dos resultados reportados serem fortemente influenciados por estes ensaios, o que os tornam indispensáveis num sistema de dosimetria TL.

Tabela 5: Informações básicas dos Ensaios do sistema descritos em documentos de referência

TESTE	ITEM DOS DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA			OBJETIVO	DESCRIÇÃO GERAL E PARÂMETROS IMPORTANTES			CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		
	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)		RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)
Homogeneidade do lote	4.5.1	-	-	Garantir que os monitores individuais de um mesmo lote possuam sensibilidades idênticas.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Dose: 2 mGy	Não previsto	Não previsto	A variação do valor avaliado de monitor individual do mesmo lote deve diferir no máximo em 30%	-	-
Reprodutibilidade	4.5.2	-	-	Assegurar que para uma mesma dose o sistema dosimétrico apresente a mesma resposta.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Dose: 10 mGy Repetição do teste: 10 vezes	Não previsto	Não previsto	O coeficiente de variação do valor avaliado não deve ser maior que 7,5%	-	-
Dependência energética e angular	4.5.9, 4.5.10	9.5	11.5	Determinar a resposta do monitor individual em relação a energia e ao ângulo de incidência dos fótons incidentes.	Nº monitor individual: n Grupos: 4 Faixa de energias: 20 a 100 keV; e ¹³⁷ Cs ou ⁶⁰ Co Ângulos: 0°, 20°, 40°, e 60° Dose: 10 mGy	Nº monitor individual: n Faixa de energias: de N15 A N300; ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, C, F Ângulos: 0°, ±60°, ±α _{max} , 90°, ±(180°-α _{max}), ±120°, 180°. Dose: não prevê	Nº monitor individual: n Faixa de energias: de N15 A N300; ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co, C, F Ângulos: 0°, ±60°, ±α _{max} , ±75°, 90°, ±(180°-α _{max}), ±105°, ±120°, 180°. Dose: não prevê	O valor de múltiplas energias e o obtido por ¹³⁷ Cs ou ⁶⁰ Co não devem diferir em mais de 30%	O valor avaliado deve pertencer ao intervalo de 0,71 a 1,67 Nota: Para IEC 62387, válida quando E _{ph} ≥ 65 KeV	
Build up dose, fading, auto-irradiação e radiação natural	4.5.7 4.5.5	11.4	13.4	Garantir que os fatores que influenciam na alteração e/ou desvio da resposta TL, não induzirão a erros inaceitáveis.	Prevê apenas a auto-irradiação: Nº de monitor individual: n Grupos: 1 Dose: Bg: 0,20 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ T. armazenamento: 1 mês	Nº monitor individual: 6; 25; Grupos: 5 Dose: Bg: 0,25 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, LID e dose de referência; T. armazenamento: 1 hora, 1 semana, t _{max}	Nº monitor individual: 6; 25 Grupos: 8 Dose: Bg: 0,25 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, LID e dose de referência; T. armazenamento: 1 hora, 1 semana, t _{max}	A leitura de dose zero não deve ser maior que 0,2 mGy	A variação da resposta devido a <i>build up</i> dose e <i>fading</i> não deve exceder de -9% a +11%; O valor indicado devido à auto-irradiação e radiação natural ≤ LID	

Tabela 5: Informações básicas dos Ensaios do sistema descritos em documentos de referência (Continuação)

TESTE	ITEM DOS DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA			OBJETIVO	DESCRIÇÃO GERAL E PARÂMETROS IMPORTANTES			CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		
	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)		RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)
Condições climáticas (temperatura, umidade)	4.5.6	11.2	13.2	Verificar o comportamento do monitor individual em relação a resposta TL que pode ser influenciada por um provável desvanecimento devido a diferentes condições climáticas que o monitor individual pode estar sujeito.	Nº monitor individual: n Grupos: 2 Dose: 10 mGy T. armazenamento: a) 24 hora e 90 dias: Condições Padrões de Teste (CPT); b) 7 dias: 50°C e umidade relativa ambiente; c) 30 dias: temperatura ambiente e 90% de umidade relativa. CPT: de 18°C a 25°C; 50% a 65% de umidade relativa.	Nº monitor individual: 6 Grupos: 5 Dose: não prevê T. armazenamento: 48 horas ou tempo determinado; Condições: a) - 10°C; b) +40°C e 60% de umidade relativa; c) Valor baixo e alto da temperatura na faixa de medição; d) CPT: 15°C a 25°C; 50% a 75% de umidade relativa	Nº monitor individual: 6 Grupos: 3 Dose: não prevê T. armazenamento: 7 dias; Condições: a) CPT; b) Valor baixo e alto da temperatura na faixa de medição; CPT: 15°C a 25°C; 50% a 75% de umidade relativa	Os valores avaliados não devem diferir do valor verdadeiro em mais de: 10% para 30 dias CPT; 15% para 90 dias; 20% para 7 dias; 20% para 30 dias a 90% de umidade.	A resposta relativa deve estar dentro do intervalo de 0,83 a 1,25.	
Linearidade	4.5.3	9.3	11.3	Garantir o padrão da resposta TL em relação a diferentes magnitudes da exposição.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Dose: 0,2 mGy a 1 Gy Repetição do teste: 5 vezes	Nº monitor individual: 5 Grupos: 1 Dose: 0,1 mSv a 1 Sv Repetição do teste: 12 vezes	Nº monitor individual: 5 Dose: três últimas doses em cada ordem de magnitude da medição (20%, 40% e 80%) Fontes utilizadas: ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co; Repetição do teste: n vezes	A resposta não deve variar em mais de 10% (0,9 a 1,10)	A resposta deve estar dentro do intervalo de 0.91 a 1,11	

Tabela 5: Informações básicas dos Ensaios do sistema descritos em documentos de referência (continuação)

TESTE	ITEM DOS DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA			OBJETIVO	DESCRIÇÃO GERAL E PARÂMETROS IMPORTANTES			CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		
	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)		RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)
Efeito da luz	4.5.8	11.3	13.3	Determinar a influência da luz sobre a resposta TL.	<p>a) Leitura zero: Nº monitor individual: 10 Grupos: 2 Energias: 40 W, do tipo luz do dia x 4 lâmpadas. Distância: 1 metro Tempo exposição: 24 horas</p> <p>b) Resposta: Nº monitor individual: 20 Grupos: 2 Dose: 10 mGy; Tempo exposição: 7 dias.</p>	Nº monitor individual: 6 Grupos: 2 Tempo exposição: 48 horas; Energias – faixa de medição: 0 a 1000 W/m ² ~ tipo luz do dia: a) exposição ao valor baixo da luz; b) exposição a luz normal do dia.	Nº monitor individual: 6 Grupos: 2 Tempo exposição: 7 dias; Energias – 45 W/m ² ~ tipo luz do dia: a) exposição ao valor máximo da luz na faixa de medição; b) exposição a luz normal do dia.	a) a dose zero deve ser ≤ LID b) o valor avaliado não deve diferir em mais de 10%	A variação da resposta não deve exceder -9% a 11%.	
Sobrecarga, efeitos posteriores, e reutilização do monitor individual	4.5.7	9.4	11.4	Assegurar que as propriedades de liberação da energia acumulada do material TL estejam adequadamente atendidas e que a sensibilidade do monitor individual, perante altas doses, não mude significativa.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Doses: 2 mGy e 100 mGy	Nº monitor individual: 5; 1; 10; Grupos: 4 Doses: referência, limites inferior e superior da faixa de medição;		O LID não deve ser ultrapassado; A resposta não deve ser modificada em mais de 10%	O valor avaliado, quando a irradiação do monitor individual for de dez vezes o valor superior da dose, deve ser maior que o referido limite superior. $0,91 \leq \left(\frac{\bar{E}_i}{E_{r,0}} \mp U_{com} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C_i} \leq 1,11$	
Incidência de radiação sobre o monitor individual	4.5.12	9.7	11.8	Prevenir uma sobre resposta TL quando o TLD for irradiado com um ângulo de incidência diferente de 0°.	Nº monitor individual: 3 Grupos: 2 Dose: 10 mGy; Ângulo: 0°C e 180°C; - utiliza simulador.	Nº monitor individual: n Grupos: 2 Dose: ≈ 3 mGy; Ângulo: 0°C, 60° a 180°; - irradiado no ar livre	Nº monitor individual: n Grupos: 2 Dose: ≈ 3 mGy; Ângulo: 0°C, α _{max} a 180°- α _{max} ; - irradiado no ar livre	A razão deve ser determinada.	$\frac{\bar{E}_{\alpha_{max} a 180^\circ - \alpha_{max}}}{E_{0^\circ}} + U_{com} \leq 1,2$ Nota: para IEC 62387 a desigualdade deve ser ≤ 1,5	

Tabela 5: Informações básicas dos Ensaios do sistema descritos em documentos de referência (continuação)

TESTE	ITEM DOS DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA			OBJETIVO	DESCRIÇÃO GERAL E PARÂMETROS IMPORTANTES			CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO		
	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)		RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)	RT 002 IRD (H _x)	IEC 61066 H _p (10)	IEC 62387 H _p (10)
Resistência a impactos	4.5.13	13.2	15.2	Este teste destina-se a verificar a robustez do monitor individual e seus componentes.	Nº monitor individual: 10 Altura de suspensão: 150 cm; Forma: queda livre; Repetição do teste: 10 vezes.	Nº monitor individual: 6 Grupos: 2 Altura de suspensão: 100 cm; Forma: queda livre, nas 6 faces do monitor individual; Dose: 7 LID	Nº monitor individual: 6 Grupos: 2 Forma: queda livre, nas 6 faces do monitor individual; Dose: 7 LID	Resistência a impacto	Um monitor individual deve resistir a queda nas duas faces, sobre uma superfície plana e dura feita de betão ou de aço sem que a variação da dose exceda valor superior e inferior de 7LID após a queda	
Vibração	-	9.4	-	Assegurar que a variação do valor avaliado de cada monitor individual num lote, devido a vibração seja ínfima.	Não previsto	Nº monitor individual: n Grupos: 2 Tempo de vibração: 15 minutos; Frequência: 50 Hz.	Não previsto	-	As doses lidas não devem exceder valor superior e inferior de 7 LID. O estado do monitor individual e leitor não devem ser afetados pelo efeito da vibração.	-
Limite inferior de detecção (LID)	4.5.4	-	-	Garantir que o sistema dosimétrico detecte o limite inferior do intervalo de medição do monitor individual estabelecido.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Doses: 2 mGy e 100 mGy	Não previsto	Não previsto	LID ≤ 0,2 mGy.	-	-
Influência da presença de um Simulador	4.5.11			Verificar a resposta do monitor individual quando irradiado sobre um fantoma.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Doses: 10 mGy Energia: 60 keV Ângulo: 0°C	Não previsto	Não previsto	O valor avaliado e valor verdadeiro não devem diferir em mais de 30%.	-	-

Tabela 6: Ensaio de Caracterização e de Desempenho Essenciais para um Sistema de Dosimetria

Ensaio	Justificativa	Proposta de Informações Básicas	
		Descrição Geral e Parâmetros Importantes	Critério de Aceitação
Homogeneidade do lote	Assegurar que a resposta de monitor individual do mesmo lote sejam estatisticamente iguais, permitindo a verificação da sensibilidade de todos os monitores individuais do lote.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Dose: 2 mSv	A variação do valor avaliado de monitor individual do mesmo lote deve diferir no máximo em 30%
Reprodutibilidade	Perante a necessidade de obter respostas estatisticamente iguais quando os monitores individuais pessoais são irradiados a uma mesma dose, deve ser realizado o presente ensaio.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Dose: 10 mSv Repetição do teste: 10 vezes	O coeficiente de variação do valor avaliado não deve ser maior que 7,5%
Dependência energética e angular	Necessidade de conhecer a variação da resposta dos monitores individuais em relação a energias e ângulos diferentes, para adequadamente aplicar, se necessário, fatores de correção.	Nº monitor individual: n Grupos: 4; Dose: 10 mSv Faixa de energias: 20 a 100 keV; e ^{137}Cs ou ^{60}Co Ângulos: 0° , 20° , 40° , $\pm 60^\circ$, $\pm \alpha_{\text{max}}$, 90° , $\pm (180^\circ - \alpha_{\text{max}})$, $\pm 120^\circ$, 180°	O valor avaliado deve pertencer ao intervalo de 0,71 a 1,67
Linearidade	Assegurar a proporcionalidade entre a resposta TL e a dose absorvida pelo monitor individual.	Nº monitor individual: 5 Grupos: 1 Dose: 0,1 mSv a 1 Sv Repetição do teste: 12 vezes	A resposta deve estar dentro do intervalo de 0,91 a 1,11
Condições climáticas (temperatura, umidade)	Garantir que a informação armazenada pelo monitor individual pessoal não sofra alterações em todo o período de armazenamento, através da ocorrência de desvanecimento.	Nº monitor individual: 6 Grupos: 3; Dose: 10 mSv T. armazenamento: 7 dias; Condições: a) CPT; b) Valor baixo e alto da temperatura na faixa de medição; CPT: 15°C a 25°C ; 50% a 75% de umidade relativa	A resposta relativa deve estar dentro do intervalo de 0,83 a 1,25.

Tabela 6: Ensaio de caracterização e de Desempenho Essenciais para um Sistema de Dosimetria (continuação)

Ensaio	Justificativa	Proposta Informações Básicas	
		Descrição Geral e Parâmetros Importantes	Critério de Aceitação
Efeito da luz	Garantir a estabilidade da resposta TL perante as condições de ambiente de utilização do monitor individual pessoal.	Nº monitor individual: 6 Grupos: 2 Tempo exposição: 7 dias; Energias – 45 W/m ² ~ tipo luz do dia: a) exposição ao valor máximo da luz na faixa de medição; b) exposição a luz normal do dia. c) exposição a 10 mSv de dose.	a) a dose zero deve ser ≤ LID. b) o valor avaliado não deve diferir em mais de 10%
Sinal residual	Assegurar que a sensibilidade do monitor individual não é consideravelmente modificada pelo seu histórico térmico e a exposição a altas doses.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Doses: referência, limites inferior e superior da faixa de medição;	O valor avaliado, quando a irradiação do monitor individual for de dez vezes o valor superior da dose, deve ser maior que o referido limite superior.
Desvanecimento da resposta (fading)	Assegurar que o monitor individual pessoal não seja influenciado por fatores que possam alterar a sua resposta.	Nº monitor individual: 6; 25; Grupos: 5 Dose: Bg: 0,25 µGyh ⁻¹ , LID e dose de referência; Tempo de armazenamento: 1 hora, 1 semana, t _{max}	A variação da resposta não deve exceder de -9% a +11%;
Limite inferior de detecção	Garantir que o limite inferior de detecção do sistema é inferior ao valor do nível de registro estabelecido no País.	Nº monitor individual: n Grupos: 1 Doses: 2 mSv e 100 mSv	LID ≤ 0,2 mSv.

6.3 Desempenho de SMIEs brasileiros no período de 2010 a 2015

Perante a análise dos onze SMIEs do Brasil submetidos ao programa de acompanhamento de desempenho do CASEC, foram obtidos resultados do desempenho mensais e anuais. Estes resultados estão apresentados em faixas de classificação dos SMIEs aprovados ($D > 90\%$) e reprovados ($D < 90\%$).

Para fins de análise deste estudo, os resultados de SMIEs aprovados, em relação à quantidade dos Valores Avaliados dentro das curvas trombeta, são apresentados em subáreas classificadas da seguinte forma: SMIE aprovado com resultado na faixa de $90\% \leq D < 95\%$, SMIE aprovado na faixa de $95\% \leq D < 100\%$ e SMIE aprovado na faixa de $D = 100\%$.

Os resultados obtidos das análises dos anos de 2010 a 2015 são apresentados em forma geral na tabela 7 (número percentual dos SMIEs aprovados e reprovados em cada ano), na tabela 8 (desempenho dos SMIEs), nas figuras 13 a 18 (desempenho dos SMIEs) e figura 19 (resumo de desempenho dos SMIEs). Para o ano 2013, só foram contabilizados alguns meses para as análises efetuadas, devido a falta de dados de desempenho dos SMIEs.

Para a apresentação dos resultados, os SMIEs foram designados de 1 a 11, sem identificação real por constituir uma informação confidencial que deve ser mantida em sigilo.

Estes resultados são sustentados pelas curvas trombetas de cada SMIE, onde estão apresentadas no item 6.3.1.

Classificação de SMIE dos anos de 2010 a 2015:

Tabela 7: Classificação de onze SMIE do Brasil

Ano	Classificação de SMIE				Nº de SMIE avaliados
	Reprovado(s): $D < 90\%$		Aprovado(s): $D > 90\%$		
	Porcentagem	Nº de SMIE	Porcentagem	Nº de SMIE	
2015	18%	2	82%	9	11
2014	0%	0	100%	11	11
2013	0%	0	100%	10	10
2012	9%	1	91%	10	11
2011	0%	0	100%	10	10
2010	20%	2	82%	9	11

Fonte: Autora

Desempenho de onze os SMIES brasileiros:

Tabela 8: Desempenho de onze SMIE do Brasil

Ano	Desempenho de SMIE (D>90%)					
	90%≤D<95%		95%≤D<100%		D=100%	
	Porcentagem	Nº de SMIE	Porcentagem	Nº de SMIE	Porcentagem	Nº de SMIE
2015	27,27%	3	18,1%	2	36,2%	4
2014	36,36%	4	36,3%	4	27,2%	3
2013	0%	0	10,0%	1	90,0%	9
2012	27,27%	3	10,0%	1	50,0%	5
2011	20,00%	2	60,0%	6	20,0%	2
2010	0,00%	0	10,0%	1	70,0%	7

Fonte: Autora

Representação gráfica do desempenho de onze SMIEs Brasileiro

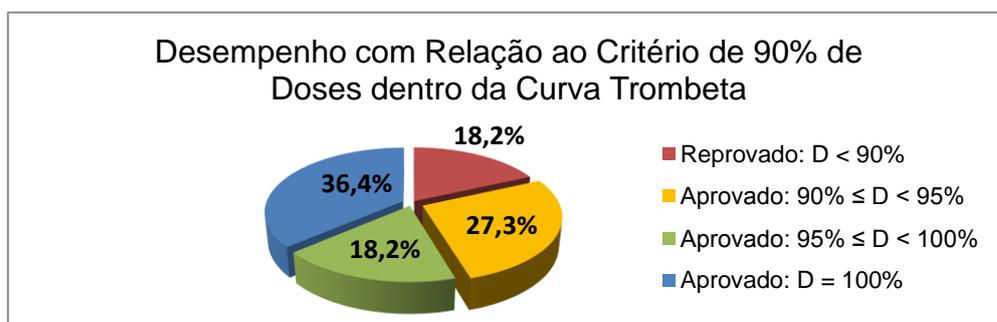


Figura 13: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2015

Fonte: Autora

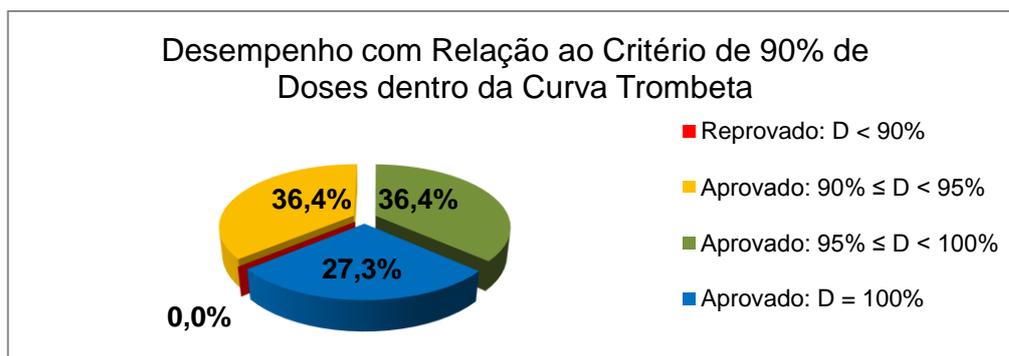


Figura 14: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2014

Fonte: Autora

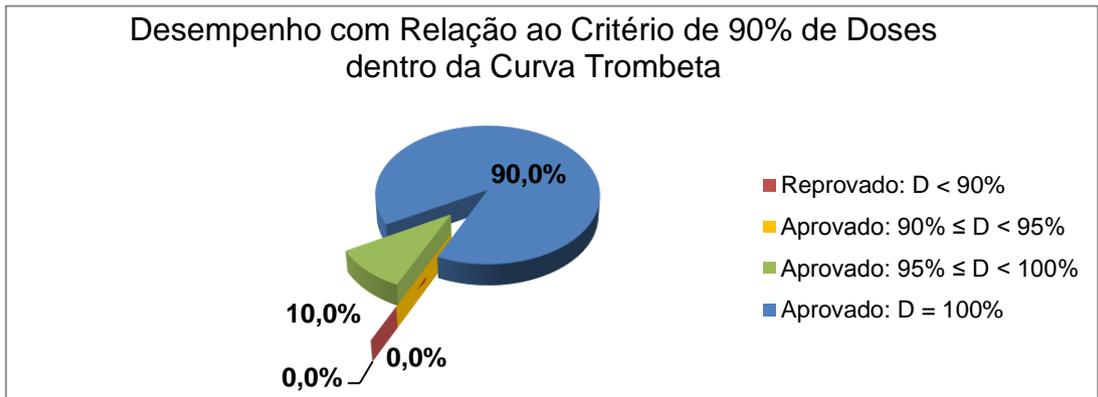


Figura 15: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2013
Fonte: Autora

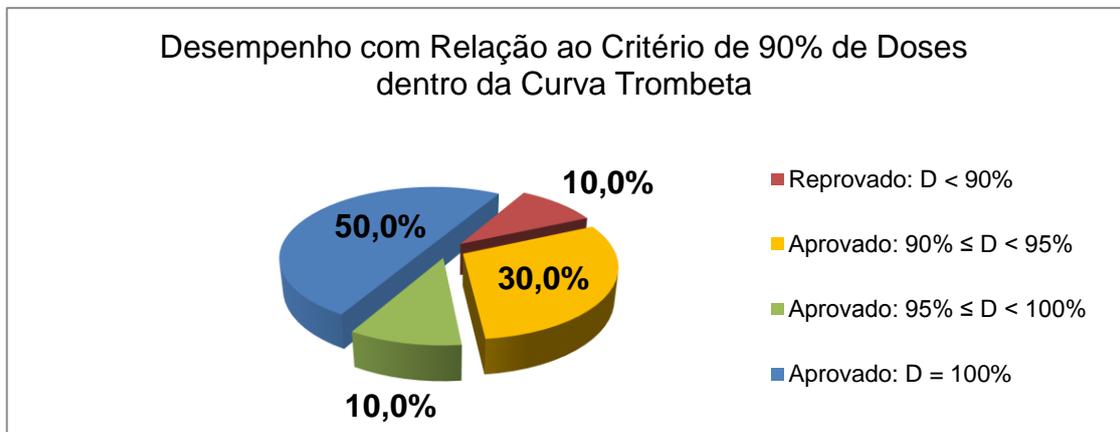


Figura 16: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2012
Fonte: Autora

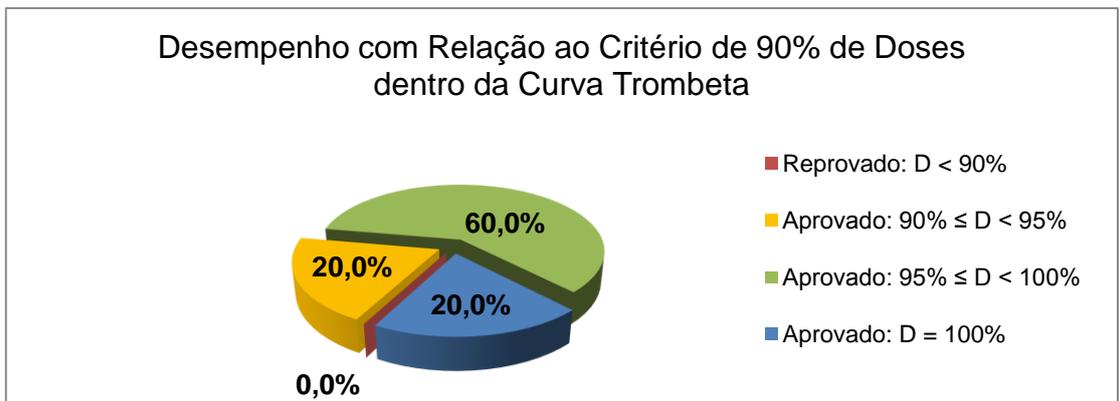


Figura 17: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no ano de 2011
Fonte: Autora

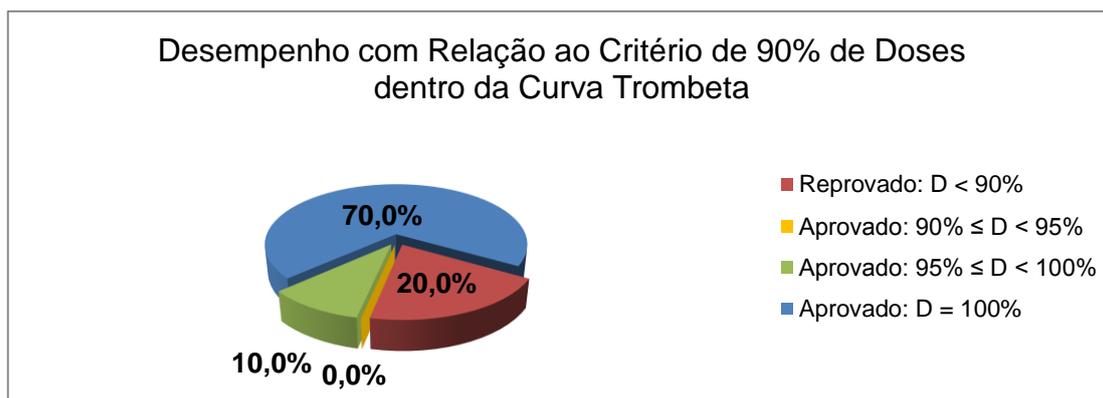


Figura 18: Desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no período de 2010
Fonte: Autora

Resumo do desempenho dos SMIE no período de 2010 a 2015

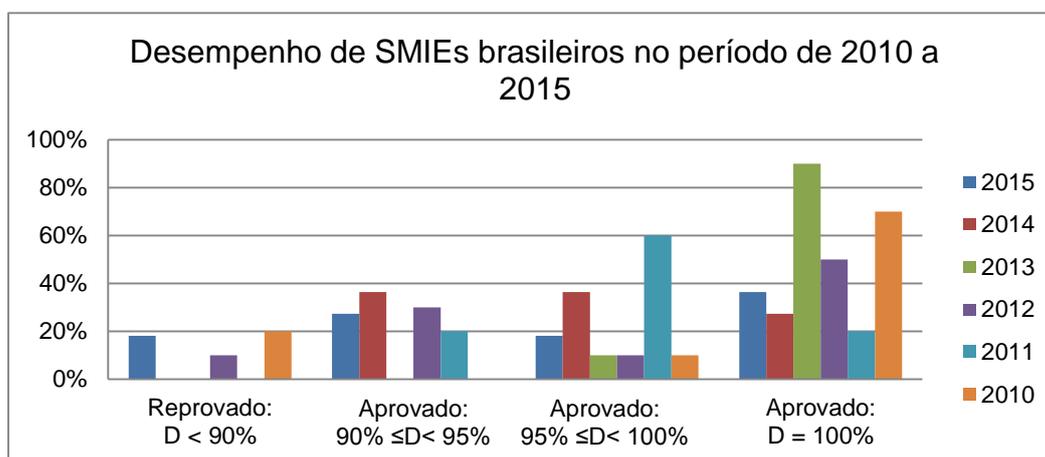


Figura 19: Resumo do desempenho dos sistemas de monitoração individual externa de onze laboratórios de dosimetria do Brasil no período de 2010 a 2015
Fonte: Autora

6.3.1 Curvas trombeta de avaliação de desempenho dos onze SMIE no período de 2010 a 2015

As figuras 20 a 30 apresentam o desempenho dos onze SMIEs Brasileiro. Para que os SMIEs sejam classificados aprovados, 90% dos valores avaliados devem pertencer a faixa do limite superior e inferior da curva trombeta, como demonstrado nas figuras supracitadas. E quanto mais os resultados estiverem próximos do valor 1 da Curva Trombeta, estes tornam-se mais satisfatórios. No entanto, para o presente estudo, foram apresentados os valores avaliados que se encontram na faixa de 20% acima e abaixo do valor 1 da Curva Trombeta.

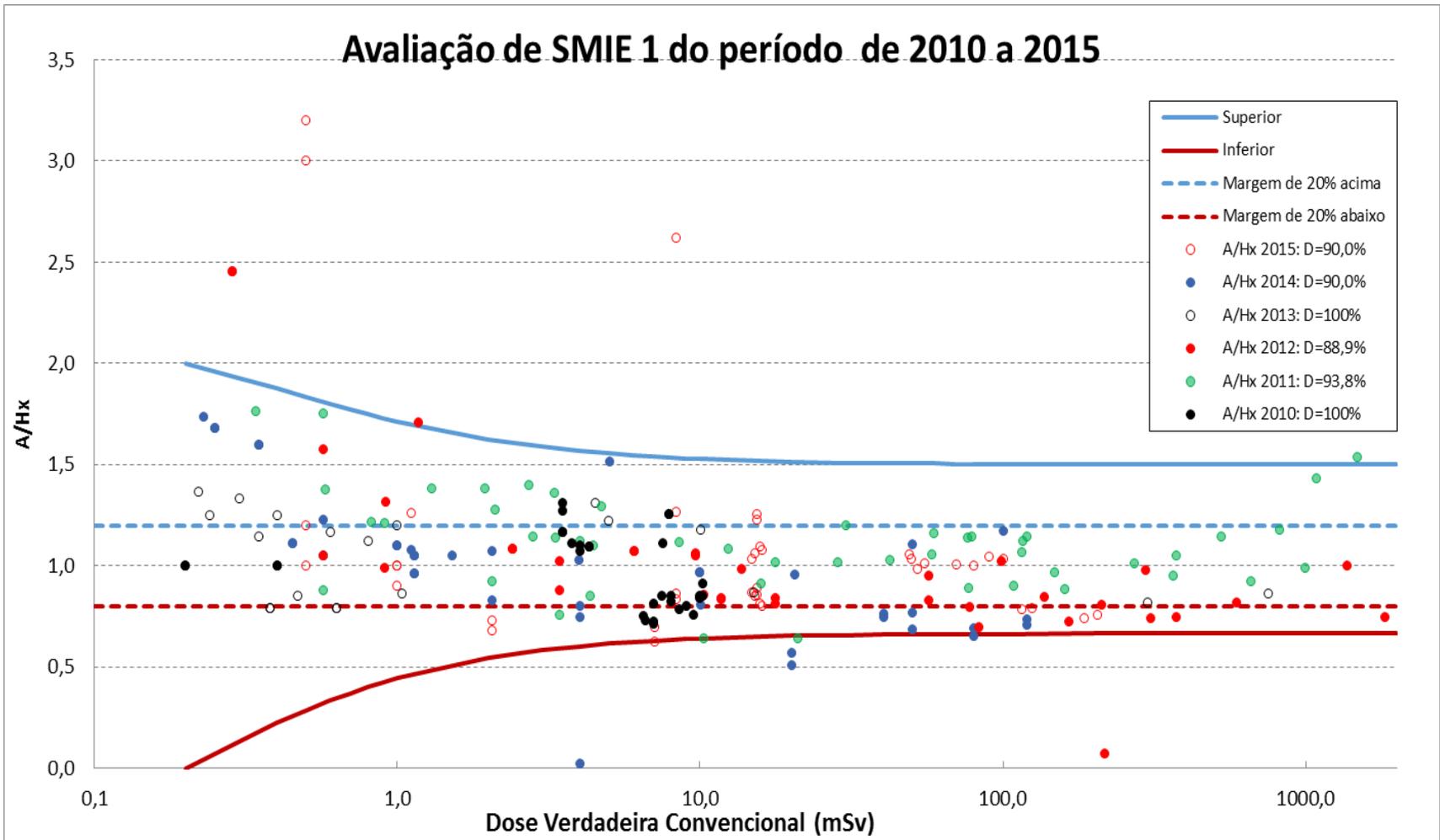


Figura 20: Desempenho de SMIE 1 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

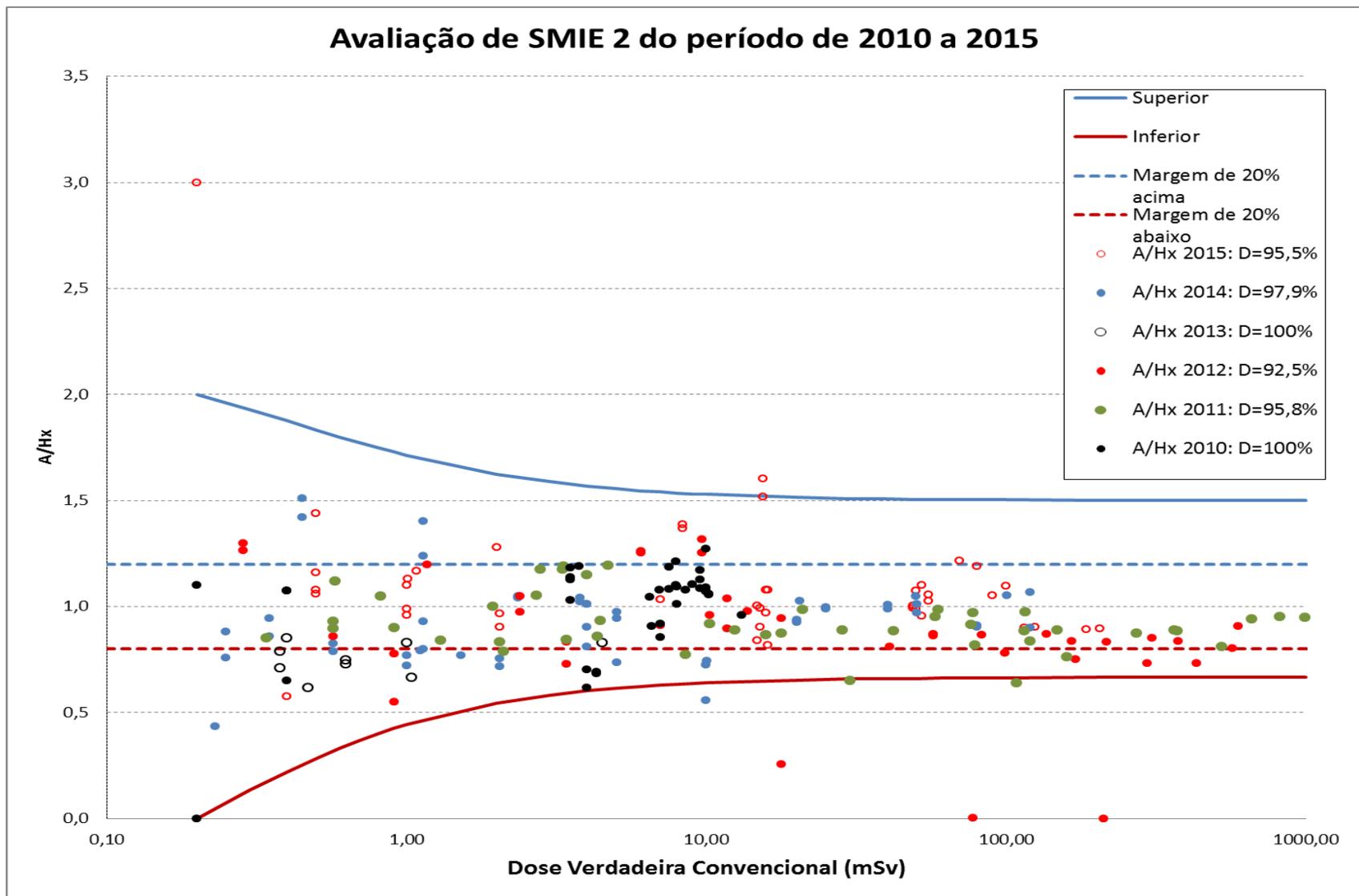


Figura 21: Desempenho de SMIE 2 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

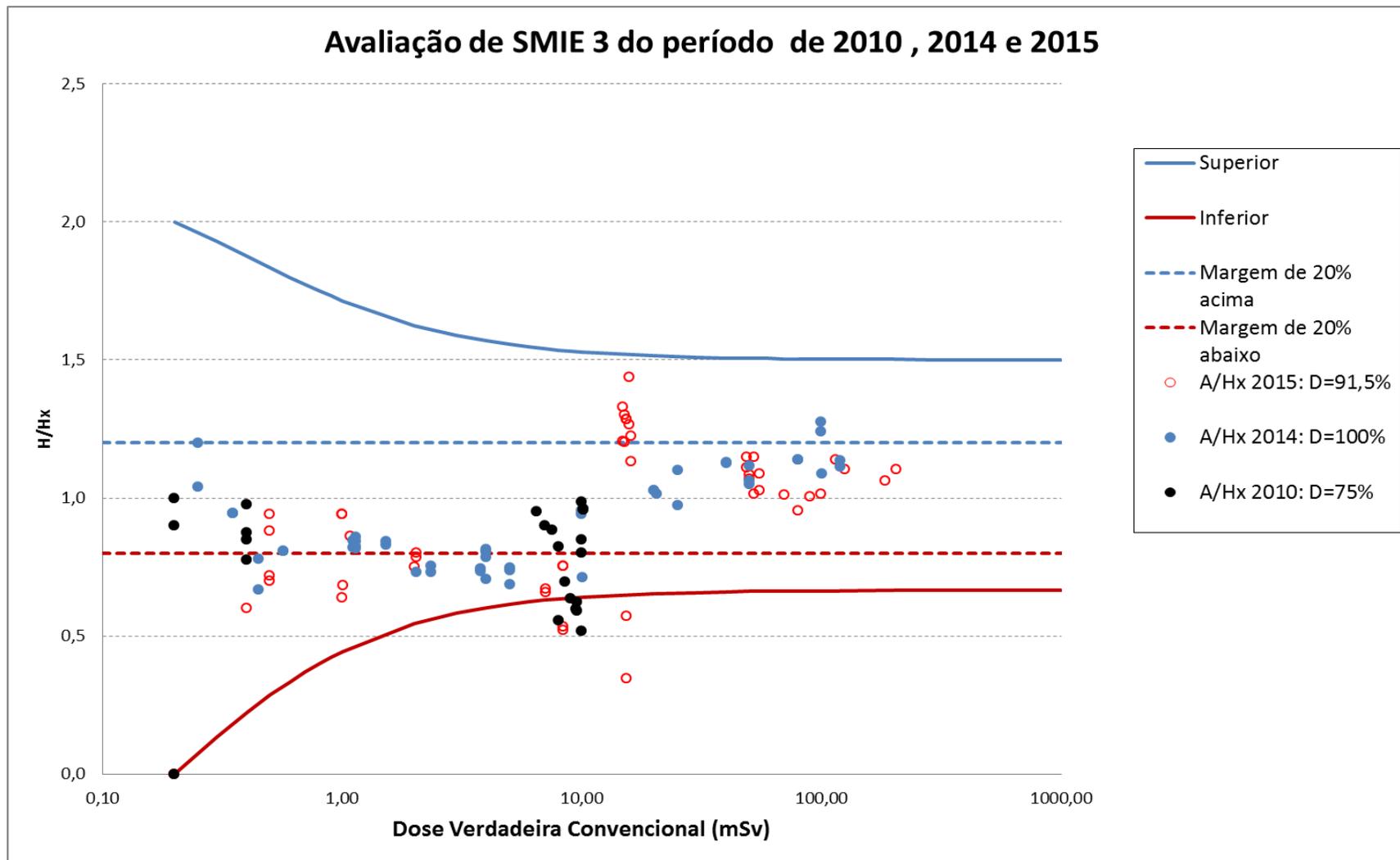


Figura 22: Desempenho de SMIE 3 no período de 2010, 2014 e 2015
 Fonte: Autora

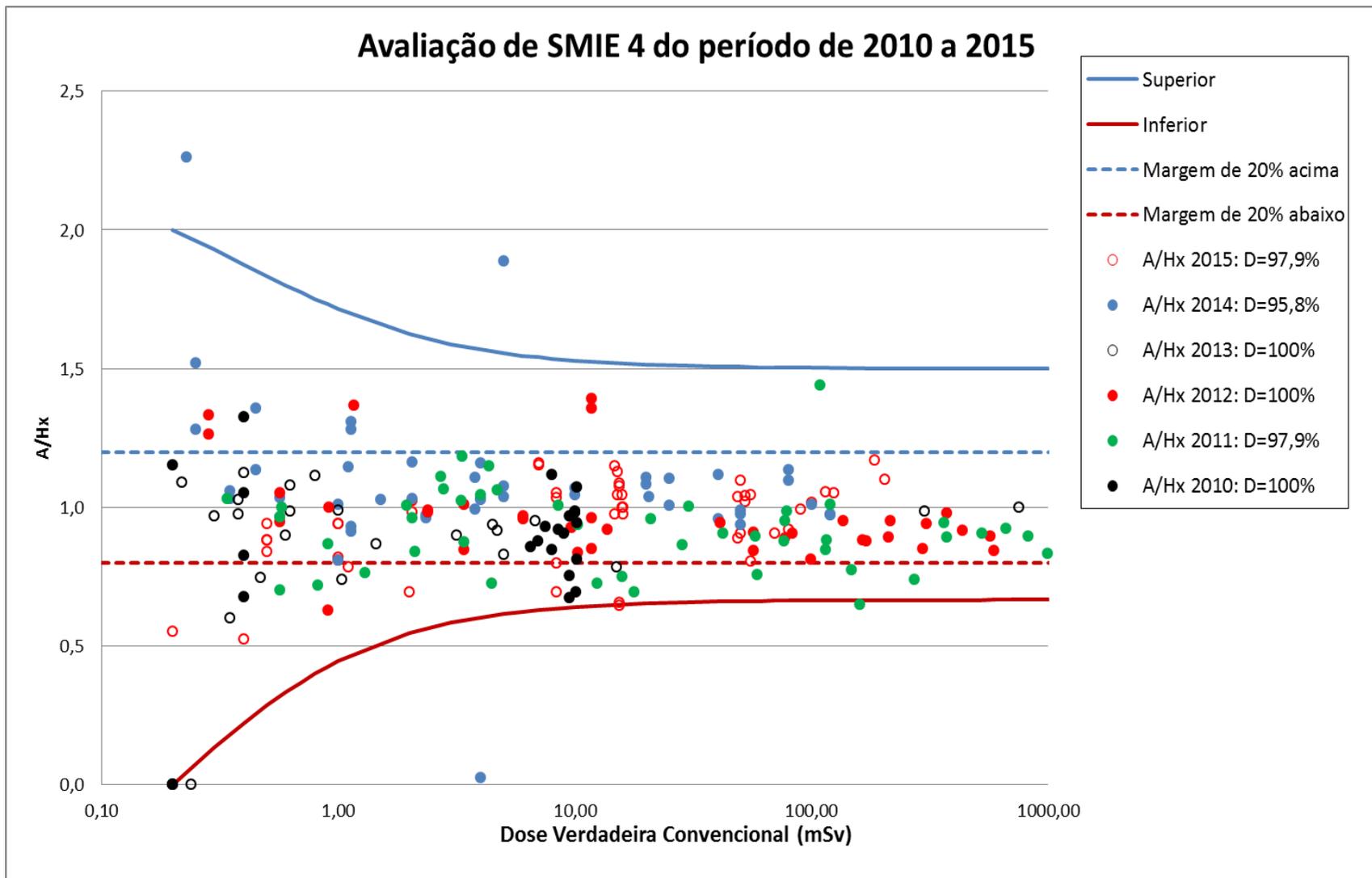


Figura 23: Desempenho de SMIE 4 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

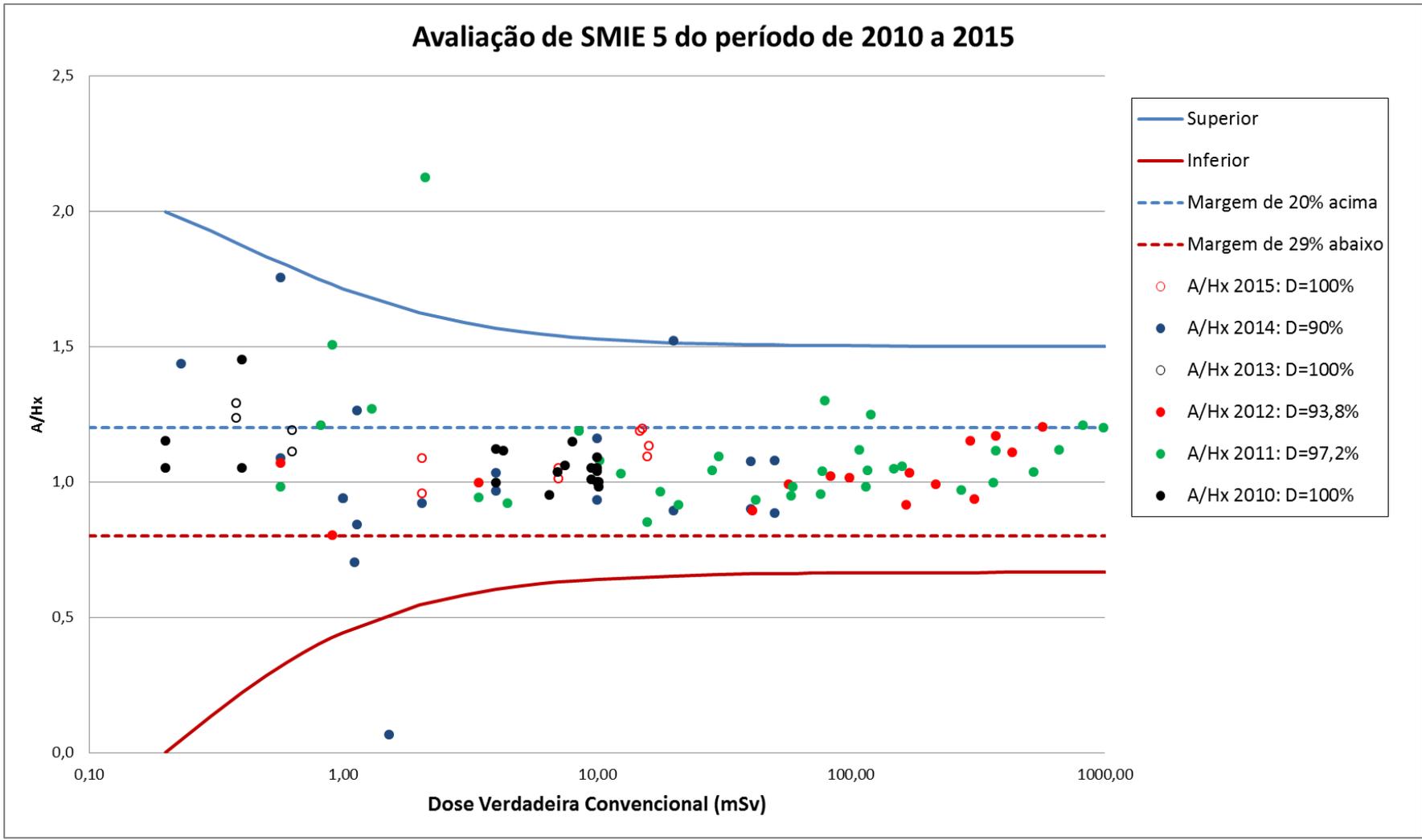


Figura 24: Desempenho de SMIE 5 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

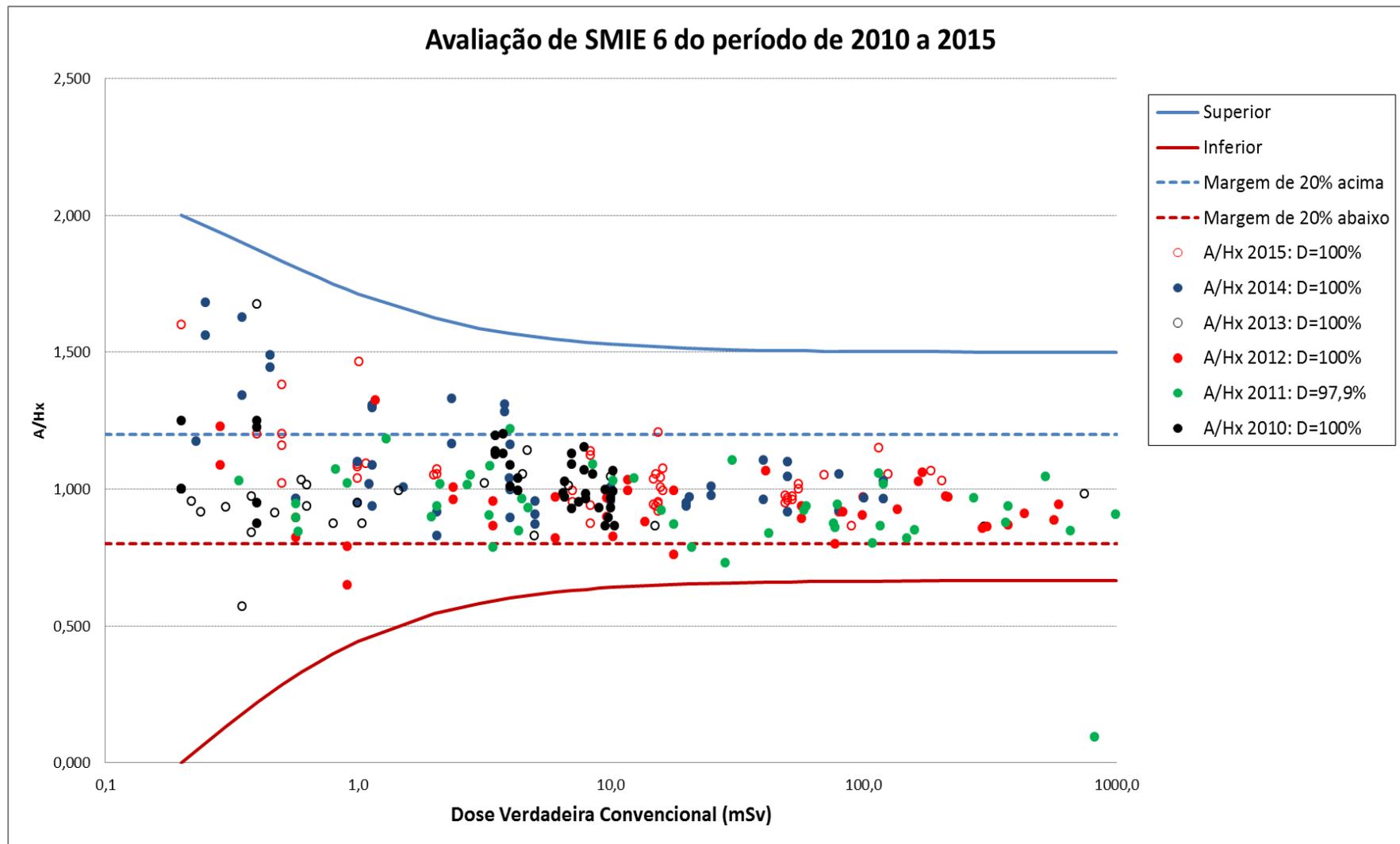


Figura 25: Desempenho de SMIE 6 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

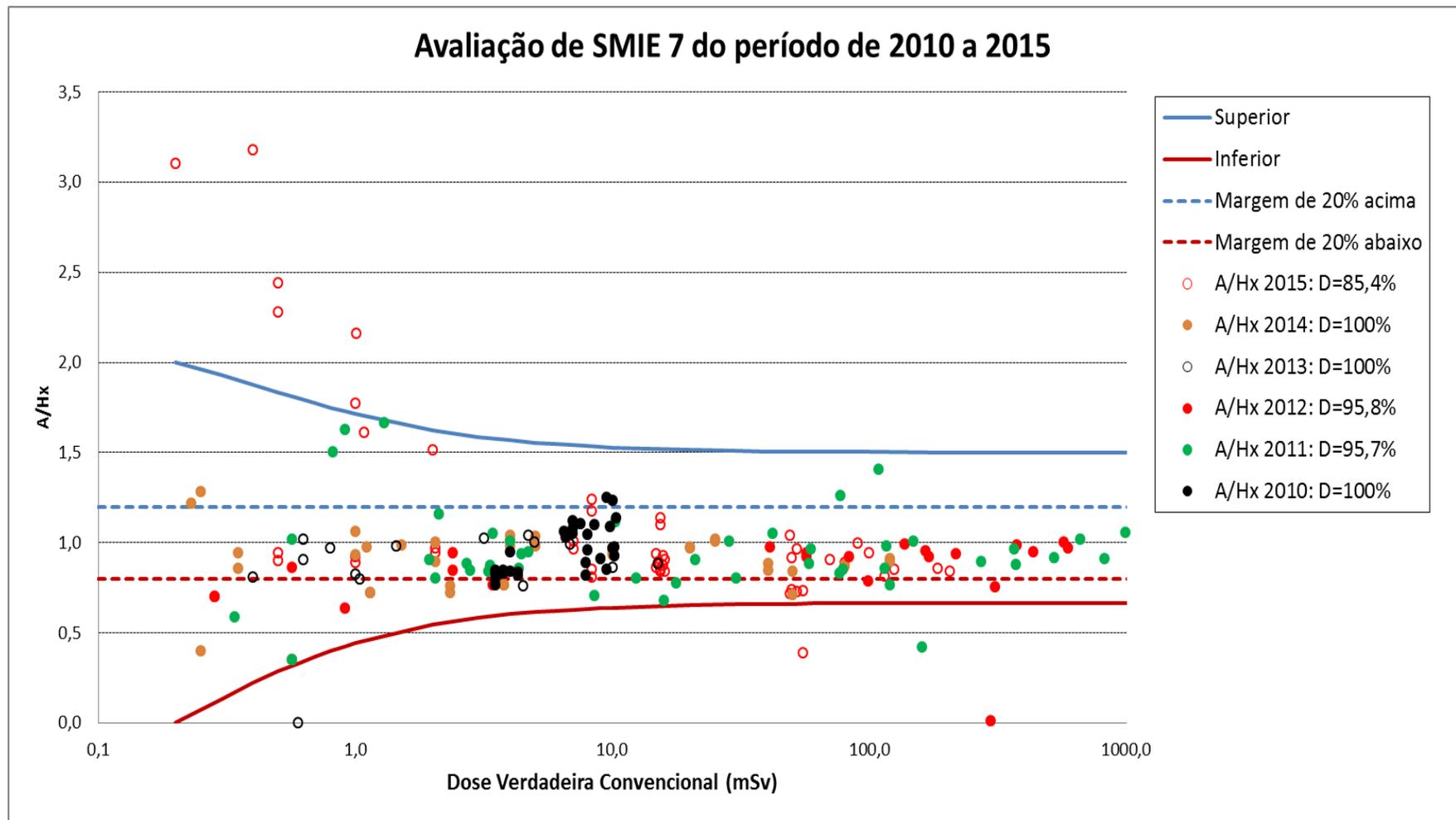


Figura 26: Desempenho de SMIE 7 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

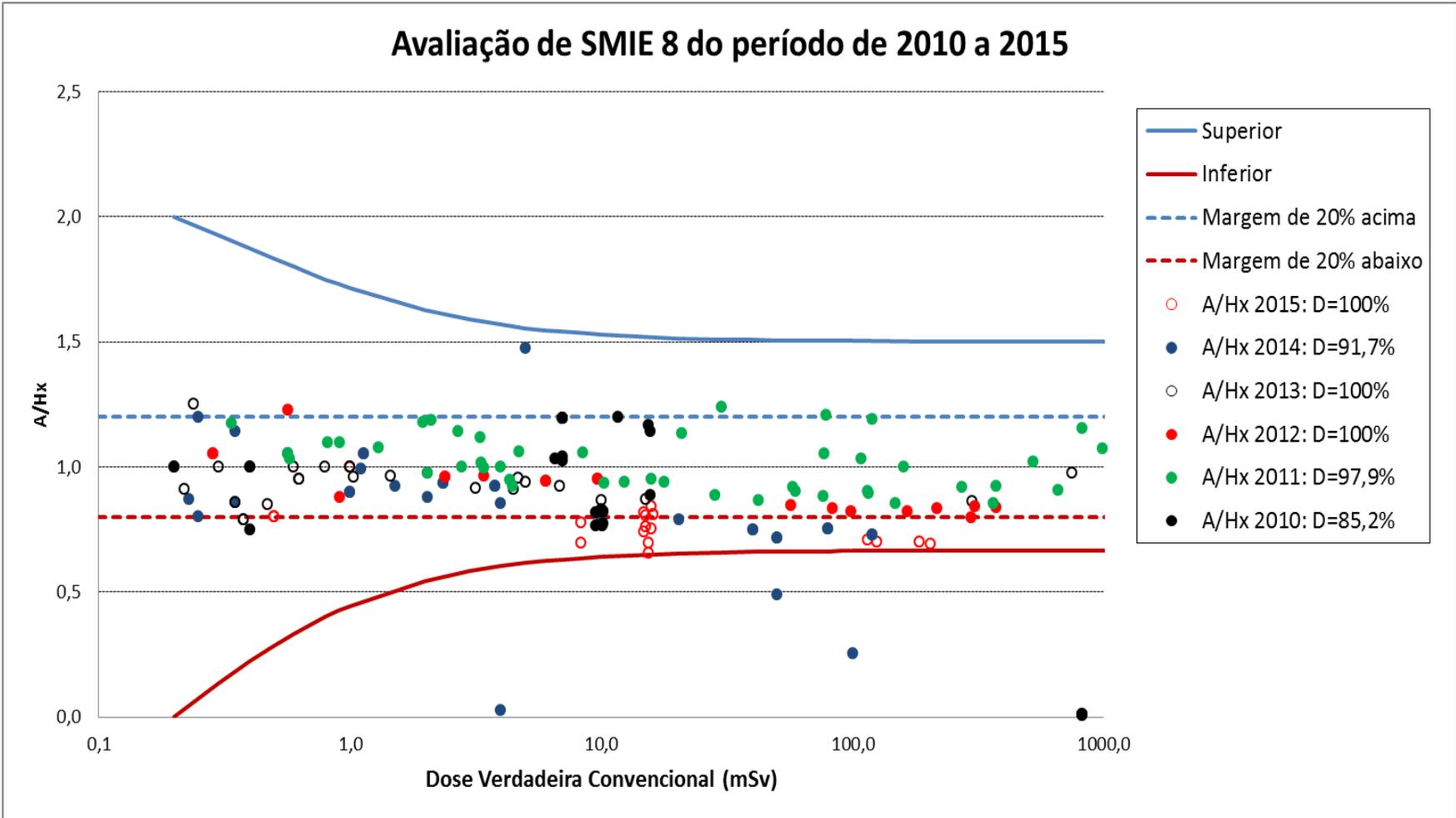


Figura 27: Desempenho de SMIE 8 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

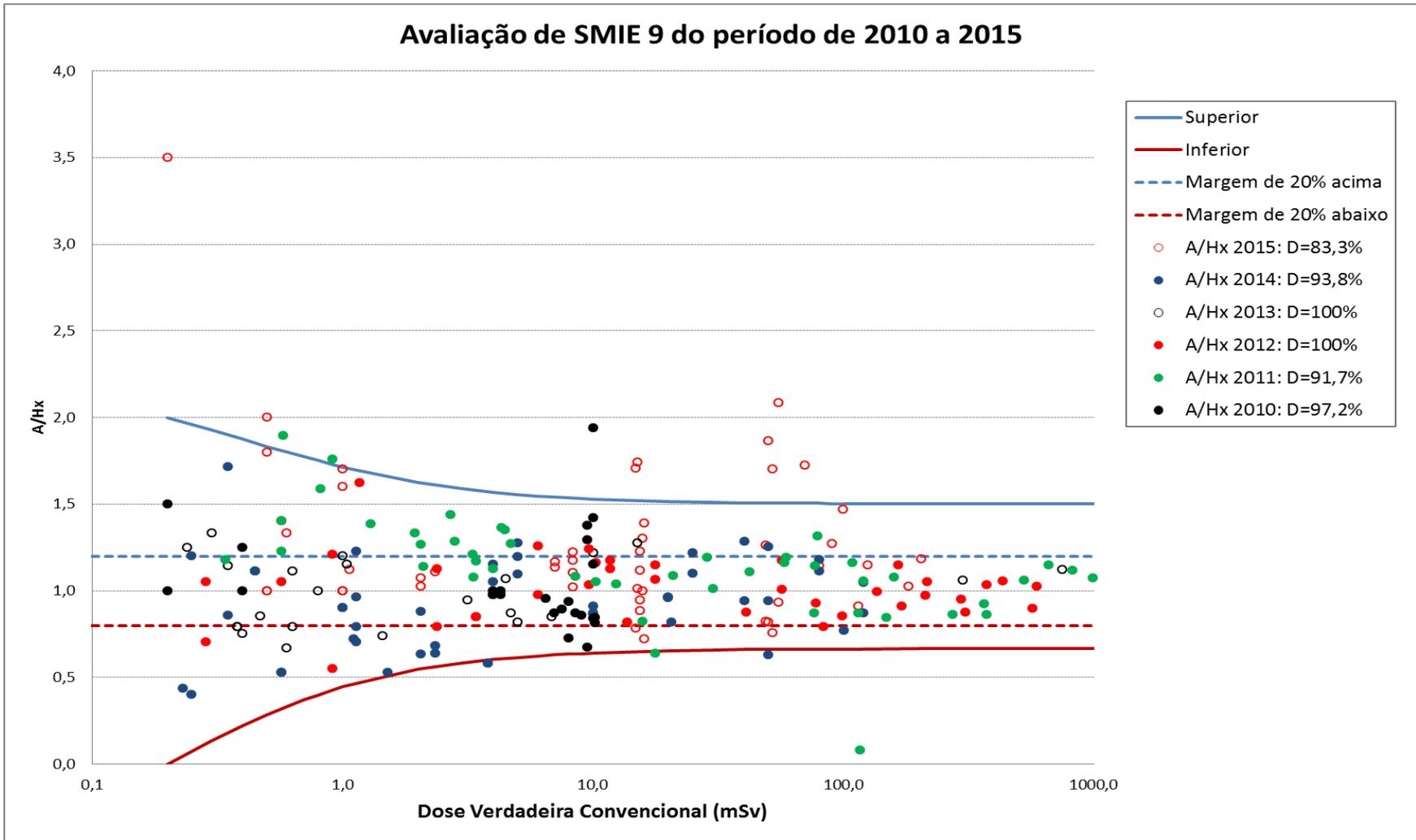


Figura 28: Desempenho de SMIE 9 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

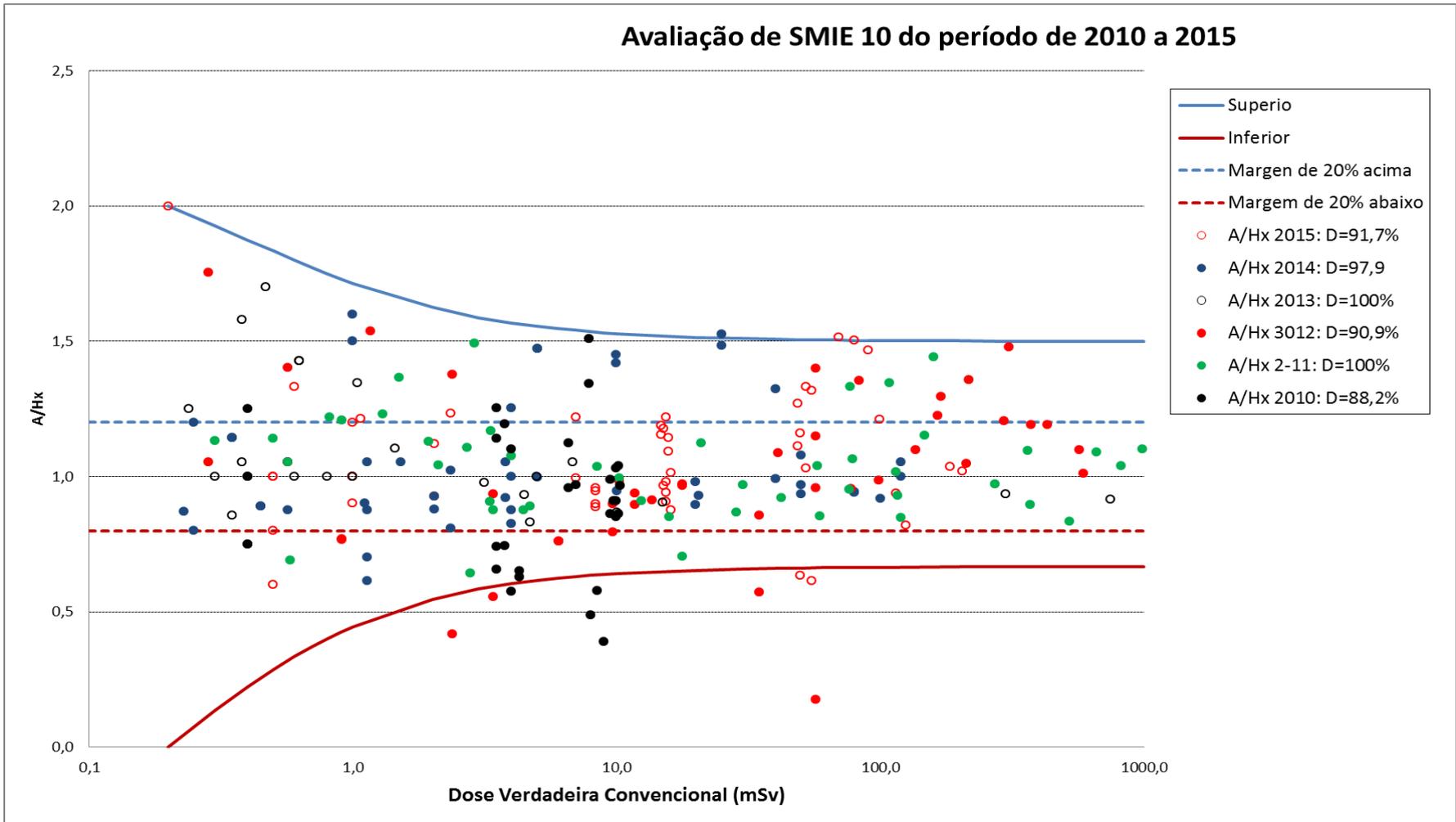


Figura 29: Desempenho de SMIE 10 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

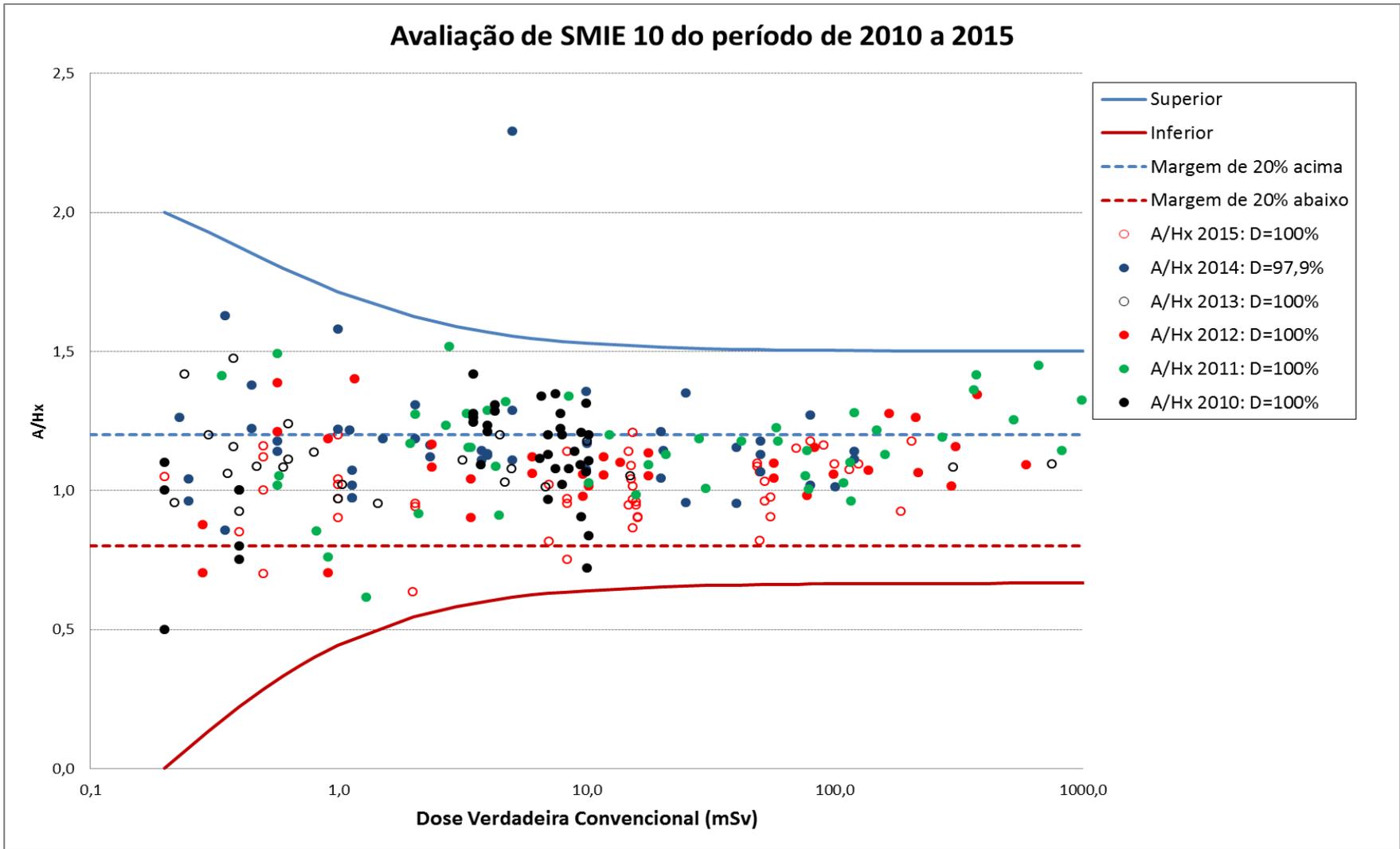


Figura 30: Desempenho de SMIE 11 no período de 2010 a 2015
 Fonte: Autora

7. CONCLUSÃO

Os requisitos técnicos para desenvolvimento e aceitação de um sistema de dosimetria termoluminescente são fundamentais para operacionalização de um laboratório de dosimetria. Estes garantem que o sistema utilizado para a monitoração forneça resultados tecnicamente confiáveis e permitem a demonstração do cumprimento dos critérios padrões estabelecidos por normas nacionais e internacionais. Os requisitos técnicos devem estar vinculados com as normas nacionais, estabelecidas pela Autoridade Reguladora e órgãos competentes de cada País, que desenvolvem critérios locais específicos de acordo com as recomendações internacionais.

Assim, para a implantação de um Serviço de Monitoração Individual Externa, é necessário que, no mínimo, sejam estabelecidos e cumpridos os requisitos técnicos e os ensaios de caracterização e de desempenho essenciais para um Sistema de Dosimetria apresentados no presente estudo. Devem ser definidas também as condições de calibração do sistema dosimétrico de forma que seja garantida a rastreabilidade metrológica. Conclui-se então que, para a implantação de laboratórios de dosimetria em um país, é essencial o estabelecimento de uma estrutura metrológica adequada.

Assim, como forma de fundamentar a implantação de um programa de acompanhamento, a avaliação do desempenho dos SMIE brasileiros permitiu não só o entendimento das ferramentas e métodos necessários para análise desse desempenho, mas também estabeleceu as bases para a interpretação adequada desses resultados.

Essa análise de desempenho dos SMIE brasileiros também forneceu parâmetros do que pode ser considerado adequado para o desempenho de sistemas dosimétricos aplicados à monitoração individual para países que ainda estejam implantados a dosimetria em seu território.

Em uma análise mais específica do desempenho dos SMIE brasileiro, apesar da maior parte destes terem sido aprovados, sugere-se que sejam verificados os fatores que levam alguns SMIEs a não apresentarem resultados melhores, quando comparados a outros Serviços ou ao seu próprio desempenho em outros períodos. Essa queda no desempenho pode indicar

limitações no sistema dosimétrico em avaliar bem doses em campos de irradiação muito distintos daqueles utilizados na calibração desse sistema.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOHM, J. **Calibration of Personal Dosimeters for Photon Radiation with Respect to the Personal Dose Equivalent $H_P(10)$** . Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany.

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/003/31003474.pdf
- 10/08/2016, 19:30 horas.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Critérios para Cálculo de Dose efetiva, a partir da Monitoração Individual**. Posição regulatória 3.01 /005, 2011.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Norma CNEN-NN-3.01. Brasil, Março/2014.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Fatores de ponderação para as grandezas de proteção radiológica**. Posição Regulatória 3.01/002, 2011.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Fatores de ponderação para as grandezas de proteção radiológica**. Posição regulatória 3.01/002, 2011.

COMITÊ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO. IRD/CNEN. **Laboratórios Certificados para Prestação de Serviço de Monitoração Individual Externa**. Janeiro 2016:
http://ird.gov.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=58&Itemid=49
-10/08/2016, 19:30 horas.

COMITÊ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA, IRD-CNEN. **Critérios Gerais Para Certificação de Um Serviço de Monitoração Individual Externa**. IRD-RT Nº 001.02, 2010.

COMITÊ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA, IRD-CNEN. **Desempenho de sistemas de monitoração individual - critérios e condições**. IRD-RT N_ 002.02, 2010.

DA SILVA, FRANCISCO CESAR AUGUSTO. **Comunicação Pessoal. Dados do CASEC/IRD**. 2016.

DA SILVA, EVERTON RODRIGUES. **Comunicação Pessoal. Dados do SMIE/IRD.** 2016.

GARCIA-ALVES, J. et al. **Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation.** Radiation Protection No 160. European Commission, Luxemburg, p. 52, 2009.

GERMAN COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Personal Dosimeter Requirements.** Adopted at the 247th meeting of the German Commission on Radiological Protection on 24/25. Fevereiro 2011.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA. **Monitoração Individual Externa.** Novembro de 1998.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA. **Monitoração Individual Externa.** Novembro de 2001.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA/COLITÉ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇO DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA (CASEC). **Desempenho de Sistemas de Monitoração Individual – Critérios e Condições,** RT No. 002.01. 2010.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation. Safety Guide No. RS-G-1.3 –** IAEA Safety Standards Series. Viena, August 1999.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA Safety Standards, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards.** General Safety Requirements Part 3. No. GSR Part 3. II Série, Julho de 2014.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Intercomparison for Individual Monitoring of External Exposure from Photon Radiation.** Results of a coordinated research project 199&-1998. IAEA- CDOC-1126, December 1999.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Intercomparison of Personal Dose Equivalent Measurements by Active Personal Dosimeters. Final Report of a joint IAEA-EURADOS Project.** IAEA-TECDOC-1564. Viena, Novembro 2007.

INTERNATIONAL STANDARD, IEC, 61066. **Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring.** Segunda edição, Junho 2006.

INTERNATIONAL STANDARD, IEC, 62387. **Radiation protection instrumentation – passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation.** Edition 1.0, Dezembro 2012.

MAURÍCIO, CLÁUDIA LUCIA DE PINHO. **Termoluminescência e Dosimetria Termoluminescente: Aplicação em Monitoração Individual.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria. 2001.

MCKEEVER, S. W. S. et al. **Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses.** Inglaterra, 1995.

MCKEEVER, STEPHEN W. S. **Optically stimulated luminescence dosimetry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 184 (2001) 29-54.** USA, Março de 2001.

https://www.researchgate.net/profile/Stephen_Mckeever/publication/221998949_Optically_stimulated_luminescence_dosimetry/links/540dff9d0cf2df04e756c6e4.pdf
- 26/07/2016, 19:29h.

OBERHOFER, M AND SCHARMANN, A. **Applied Thermoluminescence Dosimetry.** Lectures of a Course Held at the Joint Research Centre. Italy, 12-16 November 1979. Edited by Moberhofer and a scharmann.

TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** 10ª revisão, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, p. 344, 2014.

VALENTIN, J. **The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Annals of the ICRP. Publication 103. Março 2007.

ANEXOS

ANEXO I



**Serviço de Monitoração Individual Externa
Laboratório de Dosimetria de Fótons**

Comissão Nacional de Energia Nuclear
Instituto de Radioproteção e Dosimetria
Av. Salvador Allende, s/n – Barra
Cx. Postal 37750 CEP 22783-127
Rio de Janeiro - RJ – Brasil
Tel.: (21) 2173-2813 – Fax (21) 2173-2806

Eu, Everton Rodrigues da Silva, servidor federal, SIAPE 1540569, Responsável Técnico do Serviço de Monitoração Individual Externa (SMIE) do IRD, autorizo a aluna Adelaide Benedita Armando Francisco a publicar, em seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) da Pós-Graduação Lato Sensu do IRD, as informações relativas ao Sistema de Dosimetria Termoluminescente utilizado por esse SMIE e incluídas no texto do referido TCC.

Rio de Janeiro, 21 de setembro de 2016.

Everton Rodrigues.
Responsável Técnico
SMIE/IRD

Everton Rodrigues da Silva
Responsável Técnico
Serviço de Monitoração Individual Externa
Instituto de Radioproteção e Dosimetria
Mat. 005892

ANEXO II

1 Intervalo de confiança para a média \bar{x}

Suponha que os valores médios de k a quantidades x_i ($i = 1..k$) e as meia-larguras do correspondente ao intervalo de confiança U_i ($i = 1..k$) a ser dado, seja x uma quantidade combinada de valores k médio (IEC 61066, 2006):

$$\bar{x} = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad A1$$

Em seguida, a meia-largura do intervalo de confiança de relativa ao i-ésimo conjunto de medidas U_{com} é dada por (IEC 61066, 2006):

$$U_m = \frac{t_{n-1}}{\sqrt{n}} s \quad A2$$

$$U_{com} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \bar{x}}{\partial x_i} U_i \right)^2} \quad A2'$$

A combinada da incerteza relativa de $\frac{C_{r,0}}{C_i}$ com as incertezas expandidas relativas $U_{C,rel;r,0}$ e $U_{C,rel;i}$ dos valores verdadeiros convencionais $C_{r,0}$ e C_i para as diferentes qualidades de radiação (IEC 61066, 2006):

$$U_{C,com} = \sqrt{U_{C,rel;r,0}^2 + U_{C,rel;i}^2} \quad A2''$$

Onde a incerteza expandida relativa $U_{C,rel}$ do valor verdadeiro convencional C da dose equivalente deve ser inferior a $7\% = 0,07$.

2 Intervalo de confiança para o desvio padrão s

O intervalo de confiança para o desvio padrão s é : $(sU_s, a+U_s)$.

Onde: U_s é a meia largura do intervalo de confiança do desvio padrão s . caso s for calculado de n_s medidas, o limite superior de U_s com um nível de confiança de 95% será dado por (IEC 61066, 2006):

$$U_s(n_s) = t_{n_s} \cdot \sqrt{\frac{0,5}{n_s-1}} \cdot s \quad A3$$

3 Coeficiente de variação

É a razão entre o desvio padrão s com a média aritmética E de um conjunto de n medições E_j (valor indicado), dada pela seguinte equação (IEC 61066, 2006):

$$v = \frac{s}{E} = \frac{1}{E} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_j - \bar{E})^2} \quad \text{A4}$$

TABELA A.1: Valores de t_n (t Student) para n-i graus de liberdade

n_i	t_{n_i}
2	12,71
3	4,30
4	3,18
5	2,78
6	2,57
7	2,45
8	2,37
9	2,31
10	2,26
15	2,15
20	2,09
25	2,06
30	2,05
40	2,02
60	2,00
120	1,98
∞	1,96

Fonte: RT No. 002.01. 2010