



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

IVAN EUFRÁZIO DE SANTANA

**INFLUÊNCIA DAS NOVAS GRANDEZAS OPERACIONAIS PROPOSTAS PELA
ICRU 95 NA RESPOSTA DE MONITORES DE ÁREA PARA FÓTONS**

Recife
2025

IVAN EUFRÁZIO DE SANTANA

**INFLUÊNCIA DAS NOVAS GRANDEZAS OPERACIONAIS PROPOSTAS PELA
ICRU 95 NA RESPOSTA DE MONITORES DE ÁREA PARA FÓTONS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Orientadores: Helen Jamil Khoury e Vinícius Saito Monteiro de Barros

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santana, Ivan Eufrazio de.

Influência das novas grandezas operacionais propostas pela ICRU 95 na resposta de monitores de área para fótons / Ivan Eufrazio de Santana. - Recife, 2025.

73f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2025.

Orientação: Helen Jamil Khoury e Vinícius Saito Monteiro de Barros.

Inclui referências.

1. ICRU 95; 2. Monitores de área; 3. Dependência energética; 4. Equivalente de dose ambiente; 5. Dose ambiente. I. Khoury, Helen Jamil. II. Barros, Vinícius Saito Monteiro de. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

IVAN EUFRÁZIO DE SANTANA

INFLUÊNCIA DAS NOVAS GRANDEZAS OPERACIONAIS PROPOSTAS PELA ICRU 95 NA
RESPOSTA DE MONITORES DE ÁREA PARA FÓTONS

Tese Apresentada ao Programa de Pós
Graduação Tecnologias Energéticas e
Nucleares da Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociência - CTG, como requisito para a
obtenção do título de Doutor em
Tecnologias Energéticas e Nucleares.
Área de Concentração: Dosimetria e
Instrumentação Nuclear.

Aprovado em: 21/05/2025

BANCA EXAMINADORA

Dr. Vinícius Saito Monteiro de Barros (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dra. Viviane Khoury Asfora (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dra. Maysa Costa de Castro (Examinadora Externa)
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Dra. Carmen Cecília Bueno (Examinadora Externa)
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)

Dr. Charles Nilton do Prado Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP)

Dedico esta página à professora Helen Jamil Khoury (*in memoriam*) que foi a principal idealizadora e incentivadora desse trabalho e ao meu pai, Sebastião Joaquim de Santana (*in memoriam*), que mesmo sendo um simples pescador desprovido de educação, sempre tentava me mostrar que o único caminho para mudar de vida seria a educação. Quero que saiba que eu cheguei lá!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar vida e saúde e a todos os amigos e familiares que direta ou indiretamente contribuíram com a realização desse trabalho.

Um agradecimento especial a professora Dra. Helen Jamil Khoury (*in memoriam*) que foi a principal idealizadora e incentivadora desse trabalho. Obrigado pelas discussões, conselhos, ensinamentos e incentivos. Foi uma honra ter trabalhado em conjunto, mesmo que apenas por alguns anos.

Agradeço também ao professor Dr. Vinícius Saito Monteiro de Barros por ter aceitado me orientar após a partida da professora Helen e por toda as discussões e opiniões a respeito do tema, bem como por todo suporte dado na escrita do artigo.

Agradeço a toda a equipe do Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMRI) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) por todo o apoio, ajuda e discussão na parte experimental do trabalho.

Por fim, agradeço a meus sogros por muitas vezes segurar a barra com meus dois furacões (Bianca e Maria) para que eu pudesse, trabalhar, escrever, etc. E também gostaria de fazer um agradecimento especial a Bruna (minha esposa) por ter feito o máximo para que eu pudesse trabalhar nesse projeto.

RESUMO

A *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) e a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) publicaram um relatório conjunto que propõe novas grandezas operacionais, definidas nos mesmos fantasmas antropomórficos das grandezas de proteção, para representar uma estimativa mais acurada dessas últimas. A diferença entre as grandezas antigas e novas depende essencialmente da energia dos fótons, e essas mudanças podem afetar a resposta dos instrumentos utilizados para medi-las. O objetivo desse estudo foi investigar o impacto da introdução da nova grandeza operacional para monitoração de área, *Dose Ambiente* (H^*), na dependência energética de 20 monitores de área do tipo *Geiger Muller* e 2 *Câmaras de Ionização*. A dependência energética desses instrumentos foi avaliada para as qualidades de raios x definidas na ISO 4037 (*N-30* a *N-200*) e para o Cs-137 (*S-Cs*). Os resultados mostraram que o impacto da introdução de H^* é pequeno e está restrito aos instrumentos projetados para medir fótons com energias abaixo de 50 keV. De todos os monitores avaliados, alguns apresentaram uma dependência energética similar entre a grandeza atual *Equivalente de Dose Ambiente*, $H^*(10)$, e a grandeza nova, H^* . Outros, apresentaram uma melhora na resposta que corrigiu subestimações apresentadas em $H^*(10)$, especialmente em baixas energias. Esses instrumentos (total de 15) só precisariam ser recalibrados em H^* para funcionar adequadamente. Entretanto, em alguns casos, a introdução de H^* mostrou a necessidade de modificar fisicamente os instrumentos porque eles apresentaram uma superestimação exacerbada da resposta, principalmente em energias menores que 50 keV (total de 7 instrumentos).

Palavras-chave: ICRU 95; monitores de área; dependência energética; equivalente de dose ambiente; dose ambiente.

ABSTRACT

The International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) and the International Commission on Radiological Protection (ICRP) have jointly published a report recommending new operational quantities for radiological protection defined in same anthropomorphic phantoms as those applied for the protection quantities to represent more accurate estimates of protection quantities. The difference between the old and new quantities depends primarily on photon energy and these changes can affect the response of the instruments used to measure them. The aim of this study was to investigate the impact of the introduction of the new quantity for area monitoring, Ambient Dose (H^*), on the energy dependence of 20 commercially available Geiger Muller and 2 ionization chambers. The energy response was evaluated for X-ray beam qualities defined by ISO (N-30 to N-200) and for Cs-137 (S-Cs). The results showed that the impact of the introduction of H^* is small and affect more the survey meters projected to measure photons of energy below 50 keV. Some survey meters showed a similar energy dependence for the new operational quantity, H^* compared to the current operational quantity Ambient Dose Equivalent, $H^*(10)$. Others improved the response and corrected underestimations presented in $H^*(10)$, specially for low energies. These survey meters (total of 15 instruments) may be adapted to the new operational quantities requiring only a simple recalibration. However, in some cases the introduction H^* showed the necessity of to physically modify the survey meter because they showed an exacerbated overestimation of the response (total of 7 instruments).

Keywords: ICRU 95; survey meters; energy dependence; ambient dose equivalent; ambient dose.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Grandezas físicas, de proteção e operacionais.....	16
Figura 2 – Equilíbrio eletrônico aproximado	19
Figura 3 – Definição de Equivalente de Dose Ambiente, $H^*(10)$	23
Figura 4 - Definição do Equivalente de Dose Direcional, $H'(d,\Omega)$	24
Figura 5 – Novas grandezas operacionais propostas pela ICRU/ICRP 95	25
Figura 6 – Representação esquemática das geometrias de irradiação idealizadas	26
Figura 7 – Modelos de olho (esquerda) e corpo inteiro (direita)	27
Figura 8 – Razão entre os coeficientes de conversão para $H^*(10)$ e H^*	29
Figura 9 – Razão entre $h'(0,07, \varphi)$ e d'_{local} na pele, slab (φ) em função da energia	30
Figura 10 – Razão entre $h'(3, \varphi)$ e $d'_{cristalino}$	31
Figura 11 – Resposta dos monitores em $H^*(10)$, normalizadas para o Cs-137	32
Figura 12 – Resposta dos monitores em H^* , normalizadas para o Cs-137	33
Figura 13 – Resposta do Automess 6150 AD6 em $H^*(10)$ e H^*	34
Figura 14 – Resposta do Automess 6150 AD6 normalizada para 662 keV	35
Figura 15 – Resposta do dosímetro ambiental BEOSL em $H^*(10)$ e H^*	35
Figura 16 – Resposta do monitor de área RadEye G-10 em $H^*(10)$ e H^*	36
Figura 17 – Resposta do monitor de área bGeige Nano em $H^*(10)$ e H^*	37
Figura 18 – Resposta do monitor de área RadEye PRD ER em $H^*(10)$ e H^*	37
Figura 19 – Resposta do monitor de área NuEM DRONES G em $H^*(10)$ e H^*	38
Figura 20 – Irradiador OB 85/3 do LMRI	40
Figura 21 – Equipamento de raios x industrial do LMRI	40
Figura 22 – Fotos dos monitores de área avaliados.....	43
Figura 23 – Respostas relativas do monitor Arrow-Tech Dosimeter 3009 A	49
Figura 24 – Respostas do monitor Graetz X 50 DE	50
Figura 25 – Respostas do monitor Graetz GPD 100	50
Figura 26 – Respostas do monitor Ludlum mod 3.....	51
Figura 27 – Respostas do monitor Fluke Biomedical Inovision 451P	52
Figura 28 – Respostas do monitor Fluke 451P-DE-SI-RYR	53
Figura 29 – Respostas do monitor Thermo FH 40 G-10.....	54
Figura 30 – Respostas do monitor Thermo FH 40G-L 10Ω	55
Figura 31 – Respostas do monitor Thermo RadEye B20-ER	56
Figura 32 - Respostas do monitor Victoreen 190 I	56
Figura 33 – Respostas do monitor Automess 6150 AD 6/H	58
Figura 34 -Respostas do monitor Automess 6150 AD 18/H	58
Figura 35 – Respostas do monitor RAdEye G-10	59

Figura 36 – Respostas do monitor RadEye G-10Ex.....	60
Figura 37 – Respostas do monitor Mirion RDS-32 WR	61
Figura 38 – Respostas do monitor Ecotest Terra P.....	62
Figura 39 – Respostas do monitor Ecotest Terra P+.....	63
Figura 40 – Respostas do monitor Tracerco T202-A-4.....	64
Figura 41 – Respostas do monitor Bertin Mini Tracey MG-S10S	64
Figura 42 – Respostas do monitor RadInstruments MGP-101	65
Figura 43 -Respostas do monitor RADOS RDS-30.....	66
Figura 44 – Respostas do monitor MRA MIR 7028	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações dos monitores de área avaliados	42
Tabela 2 – Valores de $H^*(10)$ corrigidos pelo decaimento em 31/01/2024	46
Tabela 3 – Valores de energia média e coeficientes de conversão para $H^*(10)$ e H^*	47
Tabela 4 - Monitores de área que só precisariam ser recalibrados em H^*	69
Tabela 5 - Monitores que poderiam ampliar a faixa de energia de operação	70
Tabela 6 - Monitores de área que precisariam ser adaptados para medir H^*	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 GRANDEZAS FÍSICAS	16
2.1.1 Fluência (Φ)	17
2.1.2 Kerma (K).....	17
2.1.3 Dose Absorvida (D).....	19
2.2 GRANDEZAS DE PROTEÇÃO	20
2.2.1 Dose Equivalente (H_T)	20
2.2.2 Dose Efetiva (E)	21
2.3 GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORAÇÃO DE ÁREA.....	22
2.3.1 Equivalente de Dose Ambiente ($H^*(d)$)	22
2.3.2 Equivalente de Dose Direcional ($H'(d, \Omega)$).....	23
2.4 GRANDEZAS OPERACIONAIS PROPOSTAS PELA ICRU 95	24
2.4.1 Dose Ambiente (H^*)	26
2.4.2 Dose Absorvida Direcional ($D'(\Omega)$).....	27
2.5 IMPACTO DAS MODIFICAÇÕES PROPOSTAS PELA ICRU 95	27
3 METODOLOGIA	39
3.1 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO INSTRUMENTO NO Cs-137	45
3.2 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO INSTRUMENTO NO RAIOS X.....	46
3.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INTRODUÇÃO DE H^*	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5 CONCLUSÃO	71

1 INTRODUÇÃO

Em proteção radiológica, é essencial quantificar a exposição ocupacional em aplicações que envolvam a utilização de radiações ionizantes. A *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) estabelece grandezas de proteção, para limitar a exposição de trabalhadores e do público, tais como: *Dose Absorvida nos Órgãos* (D_T), *Dose Equivalente nos Órgãos* (H_T) e *Dose Efetiva* (E) (ICRP 103, 2007). Todavia, essas grandezas não são mensuráveis pois são definidas numa região extensa (tecido, órgão ou corpo inteiro) e não em um ponto. Assim, para estimar as grandezas de proteção, a *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) estabelece grandezas operacionais tanto para monitoração pessoal quanto para monitoração de área. A principal grandeza operacional atualmente utilizada para monitoração de área é o *Equivalente de Dose Ambiente*, $H^*(10)$ (ICRU 39, 1985; ICRU 51, 1993). Esta, corresponde a melhor estimativa da grandeza de proteção, *Dose Efetiva*.

A grandeza $H^*(10)$ é definida com base em um fantoma esférico de tecido equivalente, que não apresenta semelhança anatômica com os fantasmas antropomórficos de referência (ICRP 110, 2009) utilizados na definição da *Dose Efetiva*, grandeza de proteção que se pretende estimar. Além disso, por considerar o equivalente de dose a uma profundidade fixa de 10 mm, $H^*(10)$ tende a superestimar a *Dose Efetiva* em exposições a radiações de baixa energia (inferiores a 70 keV), uma vez que fótons com essas energias apresentam baixa capacidade de penetração nos tecidos e, portanto, não alcançam profundidades tão elevadas no corpo humano (ICRU/ICRP 95, 2020).

A ICRU, em colaboração com a ICRP, publicou o Relatório 95 (ICRU/ICRP 95, 2020), no qual é proposta a substituição da grandeza operacional $H^*(10)$ por uma nova grandeza definida com base nos mesmos fantasmas antropomórficos de referência utilizados na definição das grandezas de proteção (ICRP 110, 2009). Essa nova grandeza, denominada *Dose Ambiente* (H^*), visa fornecer estimativas mais realistas e menos conservadoras da *Dose Efetiva*, sobretudo em campos de radiação mista ou em exposições a radiações de baixa energia. A introdução do H^* implica em potenciais impactos sobre a dependência energética dos monitores de

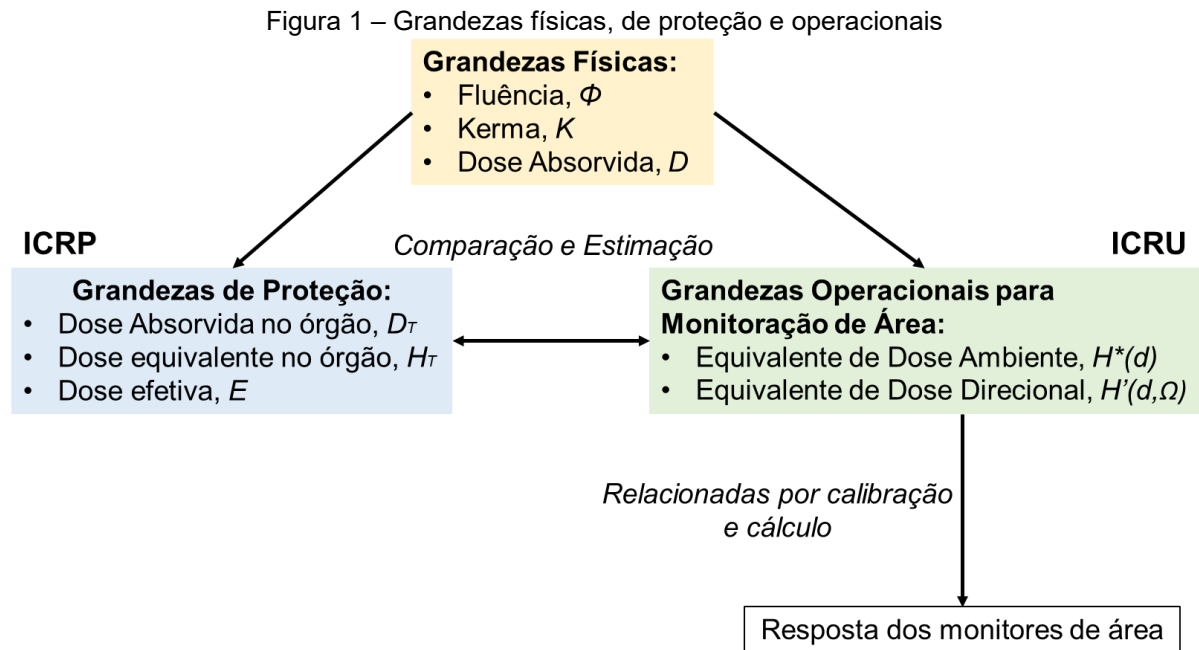
área atualmente disponíveis no mercado, uma vez que os coeficientes de conversão que relacionam as grandezas operacionais com as grandezas físicas foram atualizados, exigindo, assim, reavaliações nos sistemas de monitoração existentes. O Relatório disponibiliza uma nova série de coeficientes de conversão atualizados, calculados com base em simulações Monte Carlo em fantasmas antropomórficos, os quais abrangem uma ampla faixa de energias e tipos de radiação, e diferentes geometrias de exposição

A adoção da nova grandeza operacional *Dose Ambiente* (H^*) tem sido tema de discussão em fóruns internacionais, especialmente na União Europeia (UE) e na Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), no contexto da possível substituição das grandezas operacionais tradicionais, como $H^*(10)$. O objetivo central dessas discussões é avaliar se os benefícios metrológicos e radiológicos trazidos pela nova definição justificam os custos técnicos, regulatórios e logísticos envolvidos em sua implementação. Um dos principais desafios apontados diz respeito ao impacto sobre os monitores de área atualmente em uso, muitos dos quais foram projetados com base nos coeficientes de conversão e geometrias de campo associados à definição de $H^*(10)$. Com a introdução do H^* , esses instrumentos podem apresentar respostas inadequadas, como superestimação em radiações de baixa energia ou variações significativas com o ângulo de incidência, devido à ausência de compensações energéticas e angulares adequadas. Em alguns casos, será necessário realizar modificações físicas nos detectores, como a adição de filtros equivalentes a tecidos ou a reconfiguração da geometria sensora, para garantir que a resposta do instrumento esteja em conformidade com os novos requisitos.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da introdução da nova grandeza operacional, H^* , na resposta de 22 modelos de monitores de área comumente calibrados no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMRI), vinculado ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em Recife, Brasil. Essa avaliação é particularmente desafiadora, dada a grande diversidade de fabricantes, arquiteturas e princípios de detecção presentes no mercado nacional. No entanto, a realização desse estudo é considerada fundamental para fornecer subsídios técnicos aos órgãos reguladores, fabricantes e usuários, permitindo que cada parte compreenda a compatibilidade e o desempenho de seus instrumentos diante da possível adoção da nova grandeza H^* .

2 REVISÃO DE LITERATURA

As principais grandezas utilizadas para quantificar a exposição externa a radiações ionizantes podem ser classificadas em: grandezas físicas, grandezas de proteção e grandezas operacionais, conforme mostra a Figura 1.



Fonte: ICRU/ICRP 95 (2020, p 18) (adaptado).

Atualmente, as grandezas de proteção e as grandezas operacionais estão relacionadas com as grandezas físicas, como *Fluência* e *Kerma no Ar*, através de coeficientes de conversão calculados em fantasmas geométricos (para as grandezas operacionais) e antropomórficos (para as grandezas de proteção).

As grandezas operacionais são mensuradas através da resposta de instrumentos de medição, tais como monitores de área calibrados em um determinado feixe de radiação, e são utilizadas para estimar as grandezas de proteção.

2.1 GRANDEZAS FÍSICAS

As grandezas físicas representam os parâmetros fundamentais que descrevem a interação da radiação ionizante com a matéria e são essenciais para a caracterização de campos de radiação em ambientes controlados, como laboratórios

de calibração, instalações nucleares, hospitais e indústrias. Estas grandezas são diretamente mensuráveis e não dependem de modelos biológicos ou suposições sobre efeitos biológicos. Por essa razão, constituem a base para a determinação das demais grandezas utilizadas em proteção radiológica (IAEA, 2014; ICRU, 2011).

As principais grandezas físicas são: *Fluência* (Φ), *Kerma* (K) e *Dose Absorvida* (D).

2.1.1 Fluência (Φ)

A *Fluência* (Φ) é uma das grandezas físicas fundamentais utilizadas para descrever campos de radiação ionizante. Ela corresponde à razão entre o número de partículas incidentes (dN) numa seção de área (da) de uma esfera, conforme Equação 1 (ICRU 85, 2011).

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (1)$$

A fluência é especialmente relevante em campos de fótons, onde a interação direta com o meio depende fortemente da densidade de partículas incidentes. Além disso, ela serve como parâmetro de entrada para códigos de simulação Monte Carlo, sendo utilizada como base para estimar distribuições de dose em fantasmas e materiais diversos (IAEA, 2014). A unidade de medida de *Fluência* no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o m^{-2} .

A *Taxa de Fluência* ($\dot{\Phi}$), por sua vez, corresponde a razão entre o valor da *Fluência* ($d\Phi$) num intervalo de tempo (dt), conforme Equação 2 (ICRU 85, 2011). No SI, a unidade de medida para $\dot{\Phi}$ é o $m^{-2}.s^{-1}$.

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

2.1.2 Kerma (K)

O *Kerma*, K (Kinetic Energy Relaxed per unit of MAss), corresponde a razão entre a soma média das energias cinéticas iniciais (dE_{tr}) de todas as partículas

carregadas, liberadas em um volume elementar de massa (dm) por partículas não carregadas, conforme a Equação 3.

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

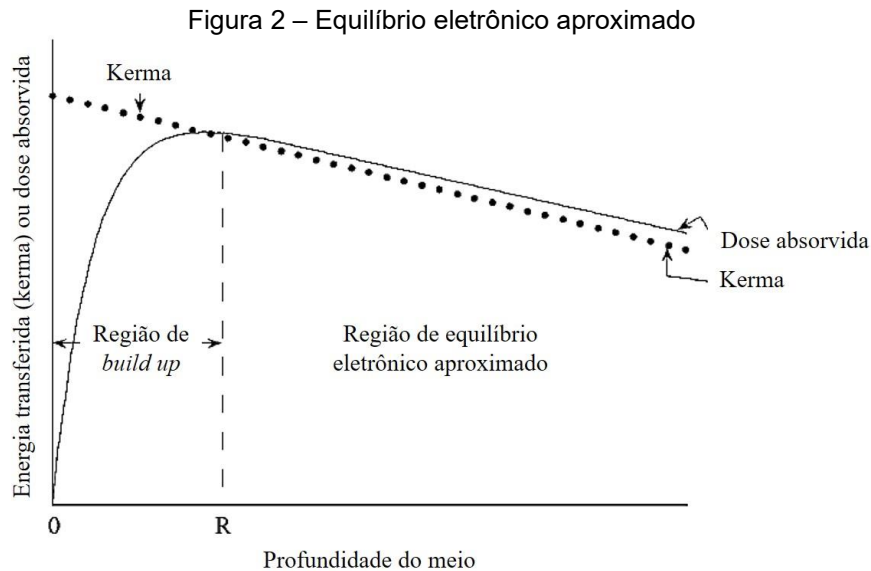
A unidade de medida do *Kerma* no SI é J/kg e recebe uma denominação especial de *Gray* (Gy).

O *Kerma* é particularmente relevante para fótons de raios x e gama e é frequentemente utilizado como grandeza de referência para calibração de instrumentos de medição de radiação, especialmente em câmaras de ionização (IAEA, 2000).

É importante notar que o *Kerma* representa a energia transferida, mas não necessariamente depositada localmente, uma vez que parte dos elétrons secundários pode escapar do volume de interesse antes de perder toda sua energia. Quando existe equilíbrio de partículas e de energia entre a produção e a absorção dessas partículas carregadas, o *Kerma* se aproxima da *Dose Absorvida*, condição conhecida como *Equilíbrio de Partículas Carregadas* (CPE) (ICRU, 2011).

O CPE é uma condição fundamental na dosimetria das radiações indiretamente ionizantes, como os fótons, e estabelece que a *Dose Absorvida* é numericamente igual ao *Kerma* quando o número de partículas carregadas que entram em um volume é igual ao número que sai, com toda a energia sendo depositada localmente (ICRU, 2011). No entanto, essa condição nem sempre é satisfeita nos monitores de área comerciais, especialmente em baixas energias (<70 keV), onde o alcance dos elétrons secundários é pequeno e o volume sensível do detector pode ser insuficiente para estabelecer o CPE (IAEA, 2000). Isso leva a distorções na leitura, particularmente quando os instrumentos foram projetados para responder de forma compatível com a grandeza $H^*(10)$, que assume CPE em um fantoma esférico de tecido equivalente a 10 mm de profundidade. Como os monitores geralmente utilizam materiais de alta densidade ou número atômico elevado, a probabilidade de interação por efeito fotoelétrico em baixas energias é maior, o que resulta em respostas superestimadas que não refletem a dose efetiva real (ISO, 2019). A Figura 2 mostra uma situação de equilíbrio eletrônico aproximado

onde é possível perceber que, após uma certa espessura R de material (região de *build up*) os valores de *Dose Absorvida* e *Kerma* são praticamente iguais.



Fonte: MARTIN (2006, p 354) (adaptado).

Na prática metrológica, especialmente em calibração de monitores de área, é comum utilizar o *Kerma* no ar como padrão de referência, conforme estabelecido na norma ISO 4037-1 (ISO, 2019) e nos códigos de prática da IAEA (IAEA, 2000). O uso do *Kerma* como grandeza física de base permite a aplicação de coeficientes de conversão para derivar as grandezas operacionais, como $H^*(10)$, ou as novas propostas, como H^* .

2.1.3 Dose Absorvida (D)

A *Dose Absorvida* (D) é uma das grandezas físicas fundamentais da dosimetria das radiações ionizantes. Ela corresponde a energia média depositada pela radiação ionizante ($d\bar{E}_{ab}$) em um volume elementar de massa (dm), conforme Equação 4.

$$D = \frac{d\bar{E}_{ab}}{dm} \quad (4)$$

A *Dose Absorvida* é aplicável tanto a radiações diretamente ionizantes quanto a radiações indiretamente ionizantes, uma vez que reflete o efeito físico real da

radiação sobre o meio. Ou seja, a energia efetivamente depositada no material após todas as interações.

Essa grandeza é utilizada em diversas áreas, desde radioterapia e controle de qualidade em radiodiagnóstico, até em proteção radiológica e metrologia, servindo como base para a definição de outras grandezas, como a *Dose Equivalente* e a *Dose Efetiva*, que incorporam fatores de ponderação para o tipo de radiação e sensibilidade dos tecidos (ICRP 107, 2007). Em muitos casos, especialmente em metrologia das radiações, a *Dose Absorvida* é avaliada em materiais específicos, como ar, água ou tecido-equivalente, a depender da aplicação. Na prática clínica, por exemplo, utiliza-se a *Dose Absorvida* na água, por sua semelhança com o tecido humano. Já em proteção radiológica, a *Dose Absorvida* no ar ou em fantomas padrões é frequentemente utilizada para estimar grandezas operacionais (IAEA, 2000; ICRU, 2011).

2.2 GRANDEZAS DE PROTEÇÃO

As grandezas de proteção foram estabelecidas pela ICRP com o objetivo de fornecer uma estimativa quantitativa do risco biológico associado à exposição à radiação ionizante. A mais recente atualização dessas grandezas foi publicada pela ICRP no ano de 2007 (ICRP 103, 2007). Nela, estão definidas as grandezas *Dose Equivalente* e *Dose Efetiva*. Essas grandezas são utilizadas como base para o estabelecimento de limites de dose em tecidos, órgãos ou no corpo inteiro, conforme previsto em normativas nacionais, como a Norma CNEN NN 3.01 (CNEN, 2024).

Por serem definidas com base na distribuição da dose em um corpo extenso e heterogêneo, e não em um ponto físico específico, as grandezas de proteção não são diretamente mensuráveis. No entanto, elas podem ser determinadas por meio de cálculos numéricos, utilizando modelos computacionais baseados em fantomas antropomórficos de referência e em dados sobre as condições de irradiação, como o espectro de energia, a geometria de exposição e o tipo de radiação envolvida.

2.2.1 Dose Equivalente (H_T)

A *Dose Equivalente* (H_T) é uma das grandezas de proteção definidas pela ICRP com o objetivo de estimar o risco biológico associado à exposição de tecidos

ou órgãos específicos à radiação ionizante. Ela é definida para qualquer tipo de radiação e corresponde ao produto da *Dose Absorvida Média* ($D_{T,R}$) no *Tecido ou Órgão T*, exposto à radiação de tipo *R*, multiplicado pelo fator de peso (w_R) da radiação *R* (Equação 6).

$$H_T = w_R D_{T,R} \quad (6)$$

Embora não seja diretamente mensurável, a *Dose Equivalente* serve como grandeza de referência para o estabelecimento de limites regulatórios de exposição em órgãos ou estruturas como lente dos olhos, pele, mãos e pés, e também para o cálculo da *Dose Efetiva* (CNEN, 2024).

Os valores de w_R , disponibilizados pela ICRP (ICRP 103, 2007), para cada tipo de partícula e energia, representam a efetividade biológica relativa (*RBE: Relative Biological Effectiveness*) da radiação em induzir efeitos estocásticos (câncer e efeitos hereditários).

2.2.2 Dose Efetiva (*E*)

A grandeza de proteção, *Dose Efetiva* (*E*), foi criada para estabelecer limites de exposição do corpo inteiro à radiação. Esses limites tem por finalidade limitar a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos (câncer e efeitos hereditários). Ela é definida como o somatório do produto da dose equivalente em cada órgão (H_T) pelo seu respectivo fator de peso (w_T), conforme Equação 7 (ICRP, 2007).

$$E = \sum H_T \times w_T \quad (7)$$

Os fatores de peso para tecidos ou órgãos (w_T) estão relacionados com a sensibilidade de um dado tecido ou órgão à radiação, no que concerne à indução de câncer e a efeitos hereditários (ICRP, 2007).

A *Dose Efetiva* (*E*) representa a grandeza de proteção-alvo que se pretende estimar indiretamente por meio da leitura de monitores de área. As grandezas operacionais, como $H^*(10)$ e, mais recentemente, H^* , foram desenvolvidas para

esse fim: oferecer uma estimativa viável da dose efetiva, com margem de segurança, a partir de medições em pontos no ambiente.

2.3 GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORAÇÃO DE ÁREA

As grandezas operacionais para monitoração de área foram definidas para permitir a quantificação prática da exposição externa à radiação ionizante, por meio de instrumentos de leitura direta em pontos do campo de radiação. São grandezas mensuráveis, determinadas a partir do valor obtido em um ponto específico de um simulador padrão sob condições padronizadas de irradiação.

As grandezas operacionais para monitoração de área reconhecidas pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) são o *Equivalente de Dose Ambiental* ($H^*(d)$) e *Equivalente de Dose Direcional* ($H'(d, \Omega)$) (ICRU 39 e 51). Essas grandezas são amplamente empregadas em situações nas quais não é possível ou viável utilizar monitores individuais de radiação, sendo aplicadas para estimar indiretamente a exposição à radiação em trabalhadores e no público. Sua utilização é essencial em programas de vigilância radiológica ambiental e ocupacional, bem como em procedimentos de calibração de instrumentos de monitoração de área (ICRU, 1993; IAEA, 2000).

2.3.1 Equivalente de Dose Ambiente ($H^*(d)$)

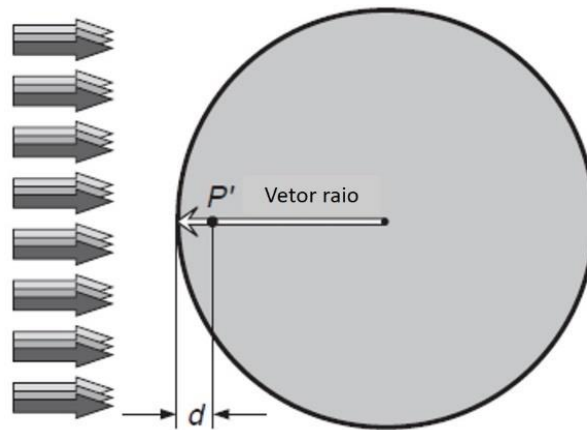
O *Equivalente de Dose Ambiente* ($H^*(d)$) em um determinado ponto P' corresponde ao valor do *Equivalente de Dose* que seria produzido, por um campo expandido e alinhado, a 10 mm de profundidade (d) de uma esfera virtual com 30 cm de diâmetro, densidade de 1 g/cm³ e composta por 76,2 % de oxigênio, 11,1 % de carbono, 10,1 % de hidrogênio e 2,6 % de nitrogênio (ICRU 33, 1980). Essa composição visa representar de forma simplificada a atenuação da radiação em tecidos moles do corpo humano.

A notação utilizada para o *Equivalente de Dose Ambiente* tem a forma $H^*(10)$ e a unidade de medida é o *Sievert* (Sv). A Figura 3 ilustra a geometria da esfera de ICRU e a profundidade de referência utilizada para a determinação do $H^*(10)$.

O $H^*(10)$ é amplamente utilizado como grandeza operacional de referência para monitoração de área, especialmente em ambientes ocupacionais. Essa

grandeza foi concebida para fornecer uma estimativa conservadora da *Dose Efetiva*, assegurando que a exposição registrada por monitores de área não subestime o risco radiológico. Por essa razão, o $H^*(10)$ é adotado em programas de vigilância ambiental e ocupacional, sendo também a base para a calibração de instrumentos de monitoração de área em laboratórios de metrologia das radiações. Além disso, os valores obtidos são utilizados para verificação de conformidade com os níveis de investigação e limites regulatórios, conforme estabelecido em normas como a CNEN NN 3.01 (2024).

Figura 3 – Definição de Equivalente de Dose Ambiente, $H^*(10)$



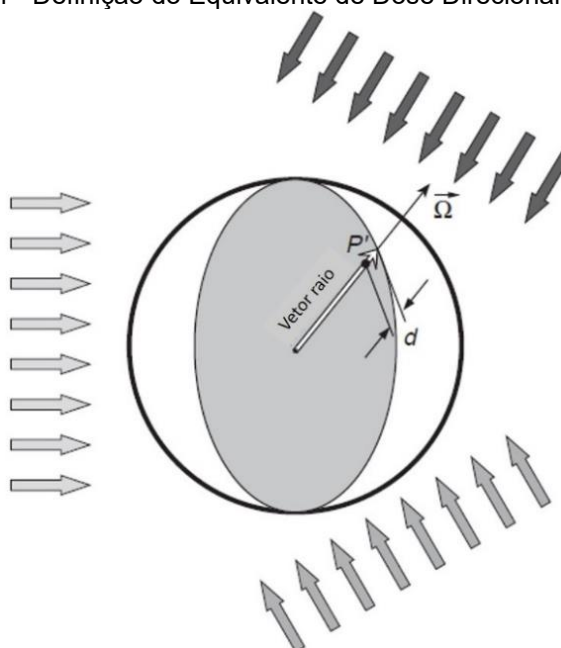
Fonte: IAEA Safety Reports Series N° 16 (2000, p 13) (adaptado).

2.3.2 Equivalente de Dose Direcional ($H'(d, \Omega)$)

O *Equivalente de Dose Direcional* ($H'(d, \Omega)$) em um ponto P' de um campo de radiação é o valor do *Equivalente de Dose* que seria produzido pelo correspondente campo expandido na esfera da ICRU (ICRU 33, 1980) na profundidade d sobre um raio na direção específica Ω (Figura 4). No SI, a unidade de medida para essa grandeza é o *Sievert* (Sv).

A profundidade d deve ser especificada, para os diversos tipos de radiação. Para radiações fracamente penetrantes, $d = 0,07$ mm para a pele e para o lente dos olhos $d = 3$ mm. A notação utilizada tem a forma $H'(0,07, \Omega)$ e $H'(3, \Omega)$, respectivamente. Para radiações fortemente penetrantes, a profundidade recomendada é de $d = 10$ mm, isto é $H'(10, \Omega)$. A Figura 4 mostra uma representação gráfica da obtenção de $H'(d, \Omega)$.

Figura 4 - Definição do Equivalente de Dose Direcional, $H'(d, \Omega)$



Fonte: IAEA Safety Reports Series N° 16 (2000, p 13) (adaptado).

Embora o *Equivalente de Dose Direcional* ($H'(d, \Omega)$) seja reconhecido como uma grandeza operacional para monitoração de área, seu uso prático é mais restrito e condicionado a cenários específicos de exposição superficial. Essa grandeza é particularmente relevante em ambientes nos quais existe risco significativo de deposição de dose na pele ou no cristalino dos olhos, como em laboratórios que manipulam fontes não encapsuladas, em instalações de produção de radiofármacos ou em procedimentos envolvendo radiação beta ou fótons de baixa energia. Sua aplicação também ganhou importância após a redução do limite ocupacional para o cristalino pela ICRP, reforçando sua utilidade como alternativa operacional à dosimetria individual. Contudo, na prática, o ($H'(d, \Omega)$) é menos utilizado que o $H^*(10)$, sobretudo em ambientes onde a exposição é predominantemente profunda, ou onde se faz uso sistemático de dosimetria individual de extremidades e cristalino. Nesses casos, o $H^*(10)$ já fornece uma estimativa conservadora suficiente para fins de vigilância ocupacional.

2.4 GRANDEZAS OPERACIONAIS PROPOSTAS PELA ICRU 95

As grandezas operacionais estabelecidas pelos Relatórios ICRU 39 (1985) e ICRU 51 (1993) têm sido amplamente adotadas como aproximações práticas das grandezas de proteção, fornecendo estimativas razoáveis para exposições a fótons

com energias compreendidas entre aproximadamente 70 keV e 3 MeV. No entanto, conforme evidenciado no Relatório 116 da ICRP (2010), essas grandezas apresentam limitações fora dessa faixa, levando a uma superestimação da *Dose Efetiva* para fótons com energias inferiores a 70 keV e a uma subestimação para energias superiores a 3 MeV. Além disso, os coeficientes de conversão disponíveis para essas grandezas foram calculados para um conjunto restrito de radiações, abrangendo principalmente fótons, elétrons e nêutrons, com geometrias simplificadas e sem consideração por anatomias antropomórficas. Tais limitações motivaram a revisão das grandezas operacionais atualmente vigentes, culminando na proposta apresentada pela ICRU no Relatório 95 (2020).

O Relatório ICRU 95 (2020) propõe uma reformulação das grandezas operacionais, substituindo as anteriores por novas definições baseadas em fantasmas antropomórficos e em métodos de cálculo mais representativos das condições reais de exposição. No contexto da monitoração de área, são recomendadas a substituição do *Equivalente de Dose Ambiente* ($H^*(10)$) por *Dose Ambiente* (H^*), e do *Equivalente de Dose Direcional* ($H'(d,\Omega)$) por *Dose Absorvida Direcional* ($D'(\Omega)$), conforme Figura 5.

Figura 5 – Novas grandezas operacionais propostas pela ICRU/ICRP 95

Grandezas Operacionais Atuais para Monitoração de Área:

- *Equivalente de Dose Ambiente*, $H^*(d)$
- *Equivalente de Dose Direcional*, $H'(d,\Omega)$



Novas Grandezas Operacionais para Monitoração de Área:

- *Dose Ambiente*, H^*
- *Dose Absorvida Direcional*, $D'(\Omega)$

Fonte: O autor (2025).

Essas novas grandezas foram concebidas para manter a praticidade metrológica exigida na monitoração operacional, ao mesmo tempo em que proporcionam uma melhor correlação com as grandezas de proteção, mesmo fora da faixa energética em que as grandezas anteriores apresentavam bom

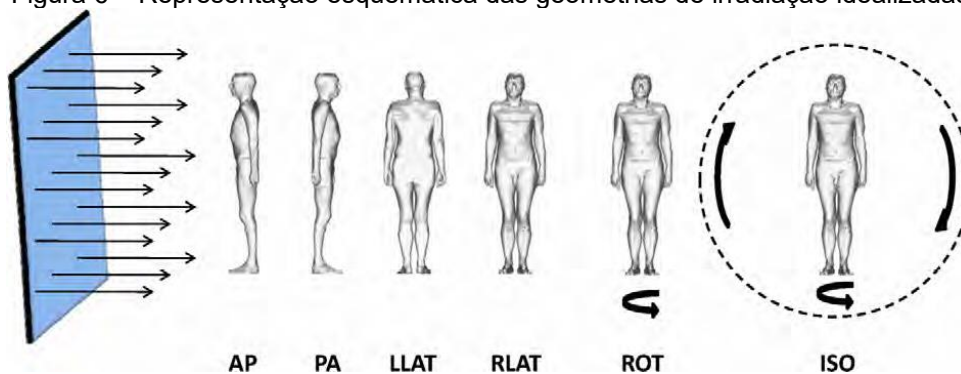
desempenho. Além disso, os coeficientes de conversão associados às novas grandezas foram calculados para uma gama mais ampla de tipos de radiação e geometrias de exposição, utilizando os mesmos modelos computacionais e fantasmas definidos pela ICRP 116 (2010), o que garante maior consistência conceitual entre proteção e monitoração.

2.4.1 Dose Ambiente (H^*)

A *Dose Ambiente* (H^*) é uma grandeza operacional proposta no Relatório ICRU 95 (2020) com o objetivo de estimar a *Dose Efetiva* de forma mais realista em situações de monitoração de área. Essa grandeza é definida como o maior valor da *Dose Efetiva* calculado entre diferentes geometrias padrão de irradiação — antero-posterior (AP), postero-anterior (PA), lateral esquerda (LLAT), lateral direita (RLAT), rotacional (ROT) e isotrópica (ISO) — em um fantoma antropomórfico de voxels, conforme especificado no Relatório 116 da ICRP (2010) (Figura 6). A unidade de medida no Sistema Internacional (SI) é o *Sievert* (Sv).

Do ponto de vista operacional, o valor de H^* , em um determinado ponto de um campo de radiação, é obtido pelo produto entre a fluência de partículas incidentes (Φ) e o coeficiente de conversão correspondente (h^*), definido como aquele que fornece a *Dose Efetiva* máxima entre as diferentes condições geométricas de exposição mencionadas. Essa abordagem permite a aplicação prática da grandeza em instrumentos de monitoração direta, assegurando maior fidelidade entre os valores registrados e os efeitos biológicos esperados, especialmente em campos de radiação complexos.

Figura 6 – Representação esquemática das geometrias de irradiação idealizadas



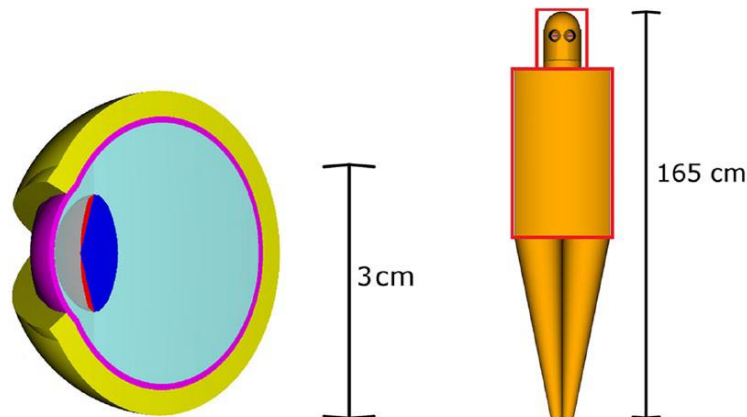
Fonte: ICRP 116 (2010, p 47) (adaptado).

2.4.2 Dose Absorvida Direcional ($D'(\Omega)$)

A *Dose Absorvida Direcional* ($D'(\Omega)$) é uma grandeza operacional proposta no Relatório ICRU 95 (2020) para estimar, de forma mais realista, a dose absorvida na lente dos olhos ($D'_{lente}(\Omega)$) e na pele ($D'_{pele}(\Omega)$), considerando uma direção específica de incidência da radiação, representada por Ω . Em ambos os casos, a unidade de medida é o *Gray* (Gy), correspondente a *joules por quilograma* (J/kg).

O valor de $D'_{lente}(\Omega)$, em um ponto de um campo de radiação com direção específica de incidência, Ω , corresponde ao produto da fluência de partículas naquele ponto, $\Phi(\Omega)$, pelo coeficiente de conversão, d'_{lente} , que relaciona a fluência da partícula com o valor da dose absorvida na lente dos olhos. Os coeficientes de conversão consideram, para uma direção Ω específica, o valor máximo da *Dose Absorvida* na lente do olho esquerdo ou direito (ICRU 95, 2020). A Figura 7 apresenta os modelos de olho e corpo inteiro desenvolvido por Behrens e Dietze (2011) e utilizados no cálculo dos coeficientes de conversão (d'_{lente}) para $D'_{lente}(\Omega)$.

Figura 7 – Modelos de olho (esquerda) e corpo inteiro (direita)



Fonte: ICRU/ICRP 95 (2020, p 26) (adaptado).

2.5 IMPACTO DAS MODIFICAÇÕES PROPOSTAS PELA ICRU 95

As modificações propostas pela ICRU no Relatório 95 (ICRU, 2020) representam uma mudança na forma como a exposição externa à radiação ionizante é monitorada e avaliada. A substituição das grandezas operacionais atualmente vigentes — *Equivalente de Dose Ambiente* ($H^*(10)$) e *Equivalente de Dose Direcional* ($D'(\Omega)$) — por grandezas definidas com base em fantomas

antropomórficos, a saber, a *Dose Ambiente* (H^*) e a *Dose Absorvida Direcional* ($D'(\Omega)$), visa melhorar a correlação entre os valores obtidos por instrumentos de monitoração e as grandezas de proteção, como a *Dose Efetiva* e a *Dose Absorvida* em tecidos críticos (ICRP, 2007; ICRP, 2010). Essa reformulação está sustentada em dados simulados com os fantasmas de voxel definidos na ICRP 110 e utilizados na ICRP 116 (ICRP, 2009; ICRP, 2010), refletindo uma abordagem mais realista das condições de exposição ocupacional e ambiental.

Essa mudança, embora tecnicamente fundamentada, traz implicações diretas na calibração, desempenho e conformidade dos monitores de área atualmente em uso, visto que os novos coeficientes de conversão foram calculados considerando uma gama mais ampla de partículas, energias e direções de incidência (ICRU, 2020). Muitos instrumentos, especialmente os baseados em detectores Geiger-Müller, podem apresentar respostas significativamente distintas sob os critérios das novas grandezas, em especial em campos de radiação de baixa energia (< 75 keV), onde o $H^*(10)$ superestima a exposição. A adoção das novas grandezas poderá demandar recalibração, ajuste no projeto dos detectores ou mesmo a substituição de instrumentos (IAEA, 2022), especialmente em ambientes regulados por critérios metrológicos mais estritos.

A resposta (R) de um monitor de área é definida como a razão entre a leitura indicada pelo instrumento (G) em um determinado ponto e o valor de referência (C) da grandeza que se deseja medir nesse mesmo ponto, conforme Equação 8.

$$R = \frac{G}{C} \quad (8)$$

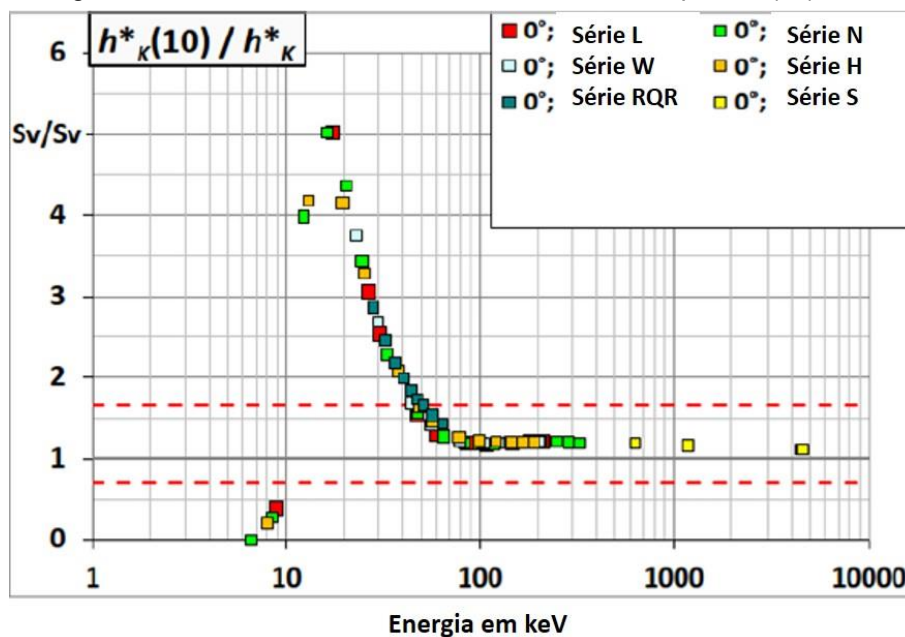
A resposta de um monitor de área depende de diversos fatores, entre os quais se destacam a energia e do ângulo de incidência do feixe de radiação o qual ele foi projetado para medir. Idealmente, um monitor de área deveria apresentar uma dependência energética e angular idêntica à da grandeza operacional que se pretende mensurar. No entanto, nenhum instrumento real possui comportamento perfeitamente ideal. Mesmo detectores projetados para grandezas operacionais vigentes, como o *Equivalente de Dose Ambiente* ($H^*(10)$), apresentam limitações significativas quando comparados às novas grandezas propostas pela ICRU 95 (2020), como a *Dose Ambiente* (H^*). Essas adaptações estão diretamente

relacionadas às mudanças nos coeficientes de conversão que vinculam as grandezas operacionais com as grandezas físicas (*Fluência* ou *Kerma*). Assim, conhecendo a resposta do monitor de área numa grandeza antiga (R_{antiga}), é possível obter sua resposta na grandeza nova (R_{nova}) através do produto entre R_{antiga} e a razão dos coeficientes de conversão (h_{antigo} e h_{novo}), conforme Equação 8.

$$R_{nova} = R_{antiga} \times \frac{h_{antigo}}{h_{novo}} \quad (8)$$

O gráfico da Figura 8 mostra a razão entre os coeficientes de conversão de *Kerma* para *Equivalente de Dose Ambiente* ($h^*_K(10)$) e para *Dose Ambiente* (h^*_K), obtidos por meio de simulações Monte Carlo para diferentes qualidades de radiação. As linhas tracejadas em vermelho correspondem aos limites da IEC 60846-1 (2009) para dependência energética em $H^*(10)$.

Figura 8 – Razão entre os coeficientes de conversão para $H^*(10)$ e H^*

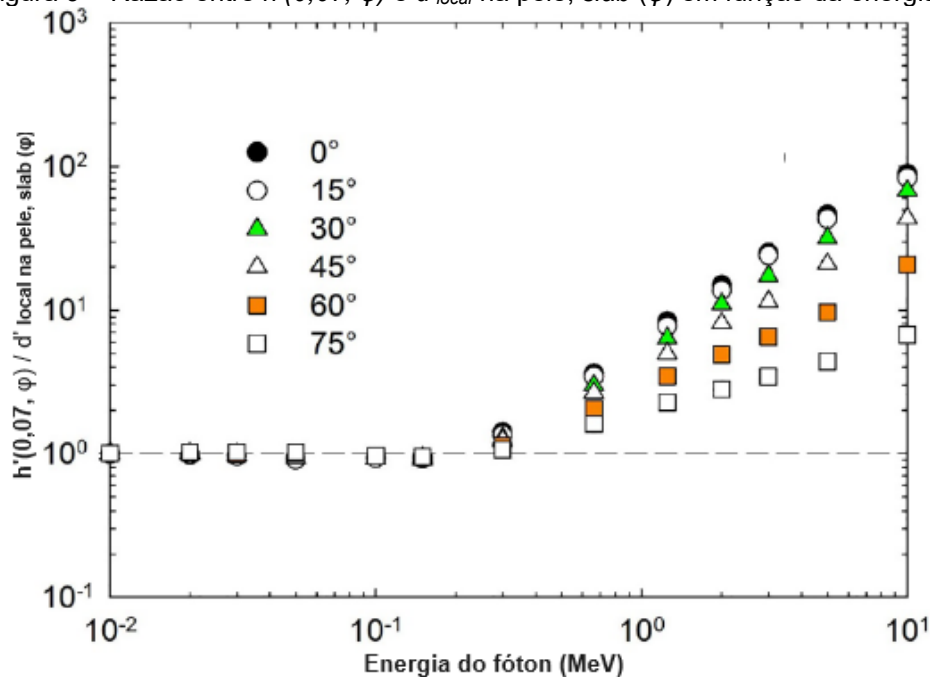


Nota-se que, para energias superiores a 70 keV, a resposta de um instrumento ideal em $H^*(10)$ é praticamente equivalente àquela em H^* . Entretanto, para energias inferiores a 70 keV, observa-se uma superestimação significativa — que pode atingir até cinco vezes — na resposta em $H^*(10)$, quando comparada à H^* . Esse efeito ocorre porque fótons com energia inferior a 70 keV não conseguem

penetrar até 10 mm de profundidade no material, resultando em uma deposição de dose mais superficial, incompatível com a definição geométrica de $H^*(10)$.

Um comportamento inverso é observado ao se analisar a razão entre os coeficientes de conversão da *Fluência* de fótons para o *Equivalente de Dose Direcional* $H'(0,07, \Omega)$, representado por $h'(0,07, \Omega)$, e para a *Dose Absorvida Direcional na pele*, $D'_{pele}(\Omega)$, expressa por $(d'_{local} na pele)$. Conforme mostrado no gráfico da Figura 9, a resposta de um instrumento ideal na grandeza $H'(0,07, \varphi)$ é praticamente equivalente à resposta em $D'_{pele}(\Omega)$ a faixa de energia compreendida entre 10 keV e 200 keV. Entretanto, para energias superiores a 200 keV, verifica-se uma superestimação da $D'_{pele}(\Omega)$, quando comparada a $H'(0,07, \varphi)$. Esse comportamento se deve ao fato de que fótons mais energéticos penetram além da profundidade padrão de 0,07 mm utilizada na definição de $H'(0,07, \Omega)$, resultando em uma deposição de energia em camadas mais profundas da pele, que não são consideradas na grandeza convencional.

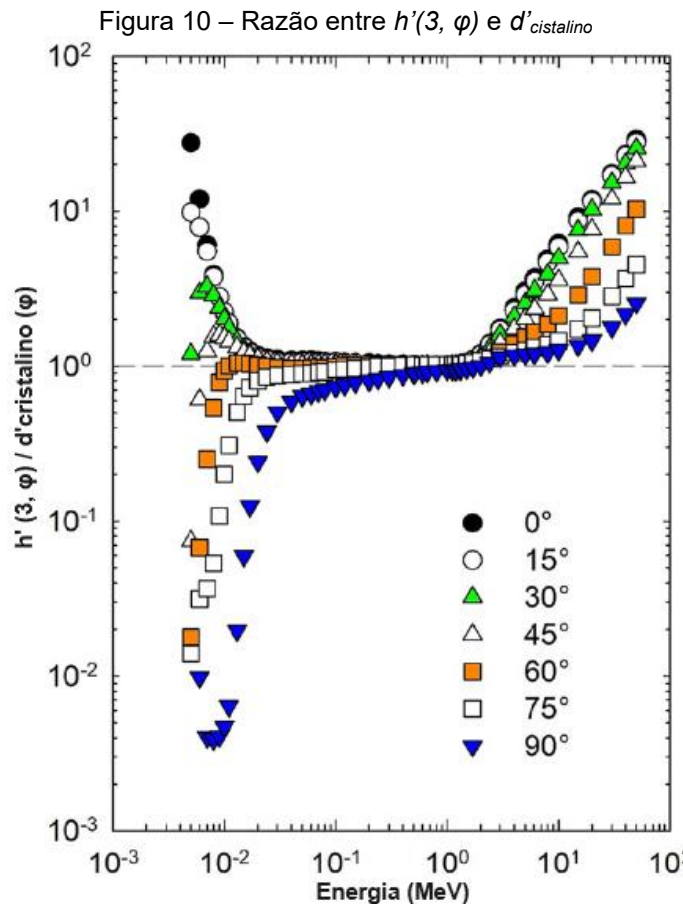
Figura 9 – Razão entre $h'(0,07, \varphi)$ e $d'_{local} na pele, slab (\varphi)$ em função da energia



Fonte: ICRU 95 (2020, p 36) (adaptado).

O gráfico apresentado na Figura 10 mostra a razão entre os coeficientes de conversão da *Fluência* de fótons para o *Equivalente de Dose Direcional* a 3 mm de profundidade, $H'(3, \Omega)$, representado por $h'(3, \Omega)$, e para a *Dose Absorvida Direcional* no cristalino, $D'_{cristalino}(\Omega)$, expressa por $d'_{cristalino}(\varphi)$. Observa-se que um instrumento

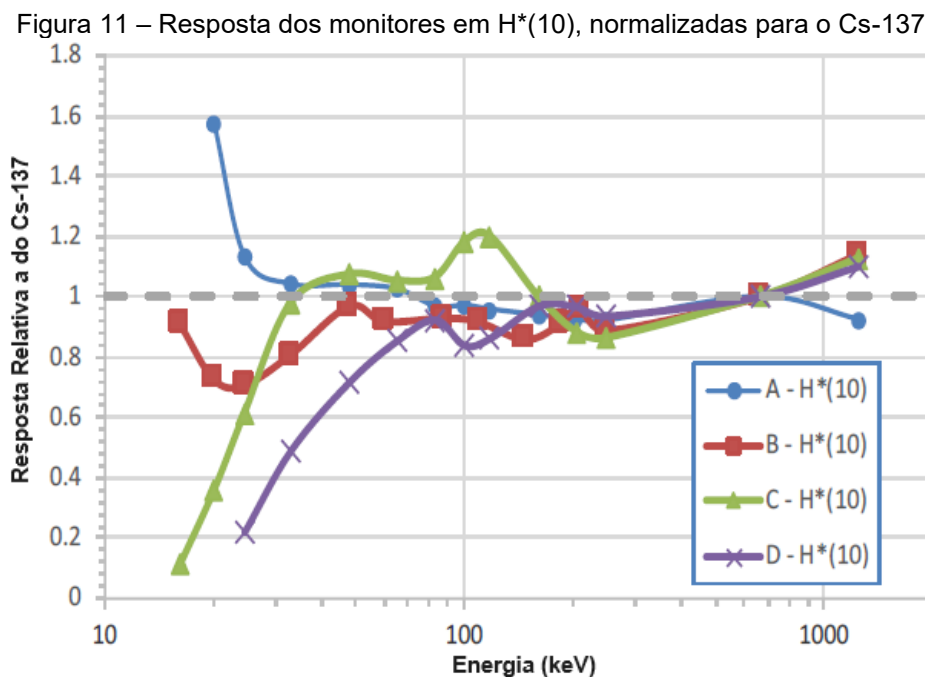
ideal, que apresenta uma resposta adequada em $H'(3, \Omega)$, tende também a fornecer uma resposta compatível em $D'_{lente}(\Omega)$ na faixa de energia compreendida entre 20 keV e 2 MeV. No entanto, para energias superiores a 2 MeV, verifica-se uma tendência crescente de superestimação da dose ao cristalino quando medida por meio da grandeza $H'(3, \Omega)$. Por outro lado, para energias inferiores a 20 keV, especialmente em ângulos de incidência entre 45° e 90° , observa-se uma subestimação da $D'_{cristalino}(\Omega)$. Já para ângulos mais frontais, entre 0° e 30° , persiste uma superestimação mesmo nessa faixa de baixa energia. Esses desvios reforçam a necessidade de reavaliação do desempenho angular e espectral dos instrumentos utilizados para fins de monitoração da exposição ao cristalino à luz das novas grandezas operacionais propostas pela ICRU 95 (2020).



Os monitores de área reais apresentam uma resposta que varia de acordo com diversos fatores, destacando-se entre eles a energia e o ângulo de incidência da radiação incidente. É comum que esses instrumentos exibam superestimação das leituras em determinadas faixas de energia e ângulos, enquanto em outras

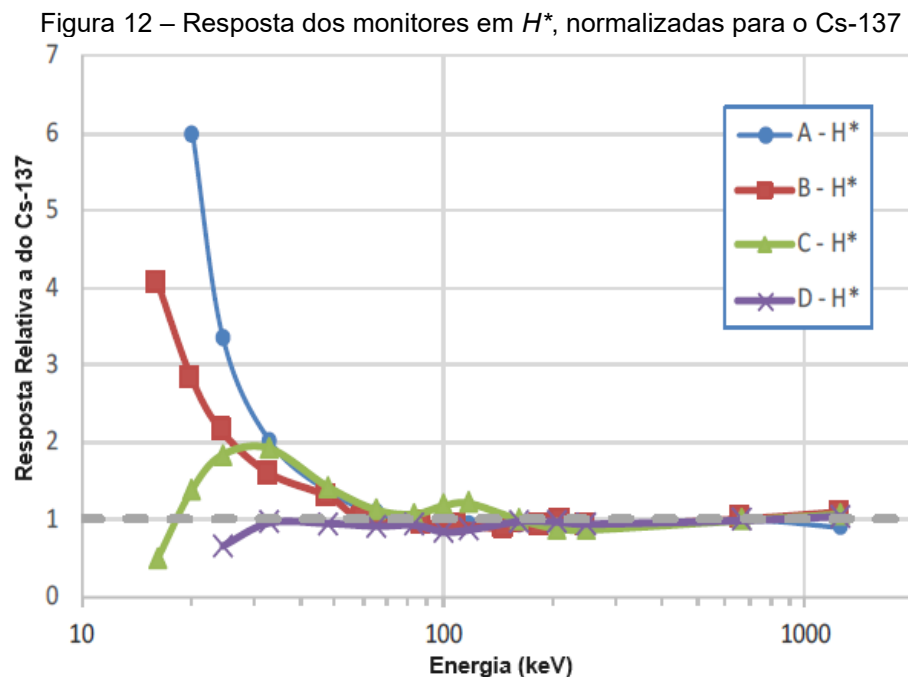
condições haja uma subestimação em relação ao valor real da grandeza operacional. Com a introdução das novas grandezas operacionais propostas pela ICRU 95 (2020), como a *Dose Ambiente* (H^*) e a *Dose Absorvida Direcional* ($D'(\Omega)$), espera-se que os monitores atualmente em uso apresentem alterações no seu desempenho metrológico, o que pode se traduzir em uma melhora ou piora da resposta, dependendo da configuração espectral e geométrica do campo de radiação. Essa variabilidade ressalta a importância de avaliar experimentalmente a adequação de cada modelo de instrumento às novas definições operacionais.

A Figura 11 e a Figura 12 mostram o impacto das mudanças propostas pela ICRU 95 (2020) na resposta de 4 diferentes monitores de área (A , B , C , D) que utilizam tubo *Geiger* e que foram construídos de maneira diferente, com diferentes materiais e filtros de compensação. Os dados estão normalizados para a resposta do instrumento na energia de referência (662 keV) (EURADOS, 2022). Observa-se que, para a grandeza $H^*(10)$, há uma subestimação da resposta relativa na faixa de baixas energias (< 70 keV) para os monitores B , C , D . O monitor A , por sua vez, apresenta uma superestimação da resposta relativa nessa mesma faixa de energia (Figura 11), evidenciando que o comportamento espectral da resposta varia de forma importante com o projeto construtivo e os materiais empregados no detector.



Fonte: EURADOS (2022, p 51) (adaptado).

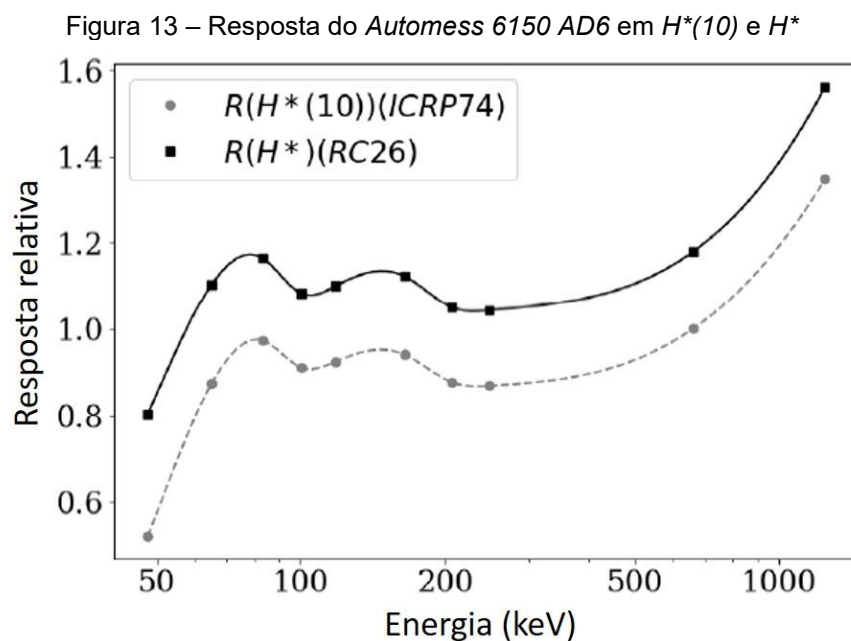
A Figura 12 apresenta a resposta relativa dos mesmos quatro monitores de área (*A*, *B*, *C* e *D*) com relação à nova grandeza proposta, H^* . Observa-se que, para energias inferiores a 70 keV, todos os instrumentos exibem um aumento na resposta relativa em comparação ao comportamento observado com $H^*(10)$. No entanto, esse aumento só foi benéfico no caso do monitor *D*, ao compensar parcialmente a subestimação anteriormente observada. Por outro lado, os monitores *B* e *C* passaram a superestimar significativamente a resposta relativa, enquanto os monitores *A* e *B* apresentaram um agravamento da superestimação já presente com a grandeza $H^*(10)$. Esses resultados reforçam que a adoção de H^* , embora traga avanços conceituais, pode gerar distorções específicas na resposta de determinados instrumentos, especialmente em campos de radiação com predominância de fótons de baixa energia.



Em síntese, entre os quatro monitores avaliados, apenas um deles (monitor *D*) poderia ser apenas recalibrado em H^* para atender adequadamente aos requisitos dessa nova grandeza operacional. Os demais instrumentos — monitores *A*, *B* e *C* — apresentaram desvios significativos de resposta em energias inferiores a 40 keV, e, portanto, demandariam modificações construtivas adicionais, como ajustes nos filtros ou na geometria de detecção, para atender aos critérios de

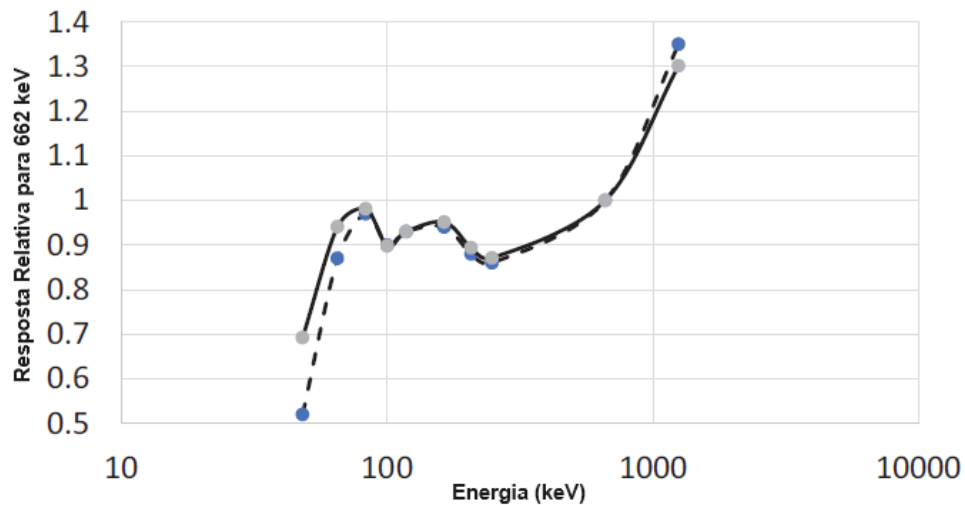
desempenho estabelecidos pela norma IEC 60846-1 (2009) no que se refere à dependência energética.

Otto (2019) avaliou a resposta de dois monitores de área comerciais e um dosímetro ambiental frente a introdução na nova grandeza operacional H^* . Os resultados indicaram que, para energias superiores a 50 keV, o impacto da substituição de $H^*(10)$ por H^* tende a ser pouco significativo, sendo necessária, na maioria dos casos, apenas uma recalibração do instrumento na nova grandeza. A Figura 13 apresenta a resposta do monitor de área comercial *Automess modelo 6150 AD 6*, nas grandezas $H^*(10)$ (linha sólida) e H^* (linha tracejada), conforme avaliação de Otto (2019). A curva de $H^*(10)$ foi normalizada em relação à energia de referência de 662 keV (radiação gama do Cs-137), enquanto a resposta em H^* foi apresentada sem normalização, ou seja, assumindo que o instrumento ainda não foi recalibrado para a nova grandeza. Observa-se que ambas as curvas possuem comportamento espectral semelhante, e que uma simples recalibração em H^* na energia de referência seria suficiente para tornar as curvas praticamente sobrepostas. Essa observação é confirmada pela Figura 14, na qual ambas as respostas — $H^*(10)$ (linha tracejada) e H^* (linha sólida) — foram normalizadas para 662 keV, evidenciando a convergência dos perfis de resposta após o ajuste.



Fonte: Otto (2019, p 7) (adaptado).

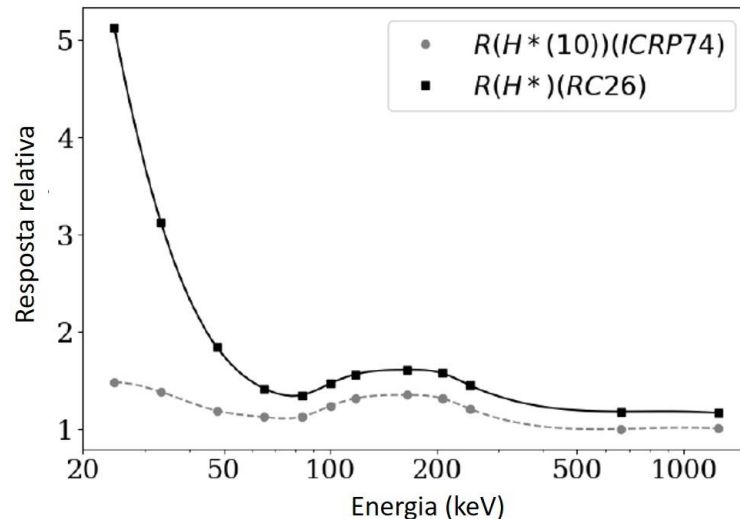
Figura 14 – Resposta do *Automess 6150 AD6* normalizada para 662 keV



Fonte: ICRU 95 (2020, p 40) (adaptado).

Por outro lado, no caso do dosímetro ambiental *BEOSL*, pode ser observada uma superestimação na resposta em energias menores que 50 keV, conforme mostra a Figura 15. Esse comportamento é esperado devido a sensibilidade de baixa energia requerida para $H^*(10)$ (Otto, 2019). Assim, esse instrumento precisaria ser fisicamente adaptado através da adição de filtros ou mudança no algoritmo de avaliação de dose para corrigir a superestimação em baixas energias.

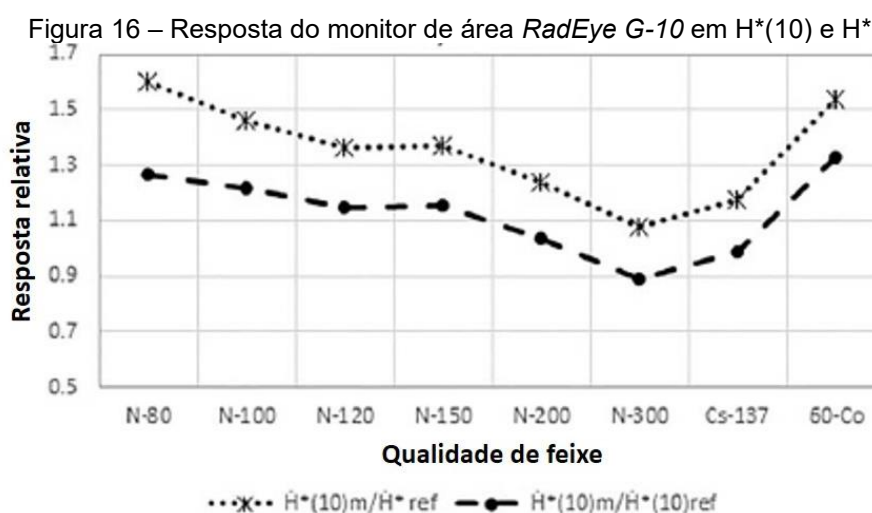
Figura 15 – Resposta do dosímetro ambiental *BEOSL* em $H^*(10)$ e H^*



Fonte: Otto (2019, p 8) (adaptado)

Čemusová e colaboradores (2022) avaliaram o impacto na resposta de 10 monitores de área frente a introdução da nova grandeza operacional H^* para energias de fótons de 65 keV a 1250 keV. Como era esperado, os resultados

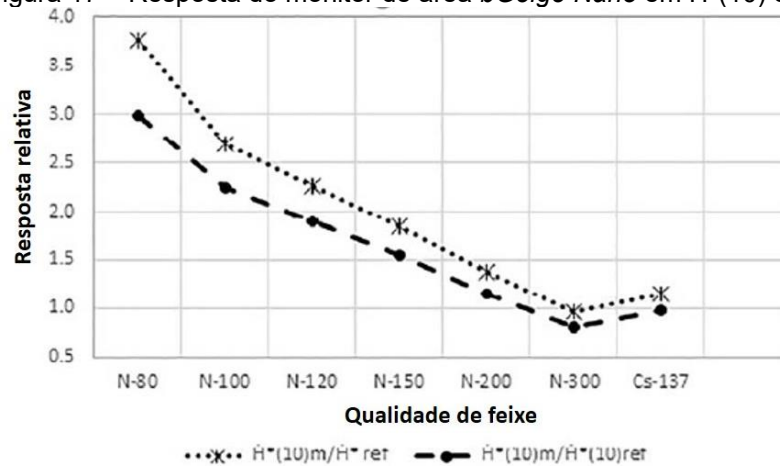
indicaram que, nessa faixa de energia, o impacto da substituição de $H^*(10)$ por H^* tende a ser relativamente pequeno, visto que as respostas relativas dos instrumentos — definidas como a razão entre a leitura do monitor e o valor da grandeza avaliada — diferem de uma grandeza para outra por um fator praticamente constante. A Figura 16 ilustra esse comportamento para o monitor de área comercial *RadEye G-10*, apresentando as curvas de resposta relativa em $H^*(10)$ (linha tracejada) e em H^* (linha pontilhada). Observa-se que o formato das duas curvas é bastante semelhante, e que o impacto da introdução de H^* , nesse caso, se limita à necessidade de uma simples recalibração na energia de 662 keV, o que permitiria alinhar as duas curvas de resposta.



Fonte: Čemusová et al (2022, p 1319) (adaptado).

Alguns instrumentos de monitoração já apresentam uma superestimação acentuada da resposta quando avaliados com base na grandeza $H^*(10)$, e essa condição pode ser ainda mais agravada com a introdução da nova grandeza H^* , devido a diminuição nos coeficientes de conversão associados às energias mais baixas. A Figura 17 apresenta os resultados obtidos para o monitor de área *bGeige Nano*, em $H^*(10)$ e H^* . É possível observar que esse instrumento já apresenta uma superestimação da resposta em $H^*(10)$ na faixa de energia de 65 keV (N-80) a 164 keV (N-200) e que, após a introdução de H^* , passará a superestimar ainda mais. A pior resposta foi observada para a qualidade de feixe N-80, com energia média de 65 keV, evidenciando a sensibilidade crítica desses instrumentos às radiações de baixa energia (Čemusová et al., 2022).

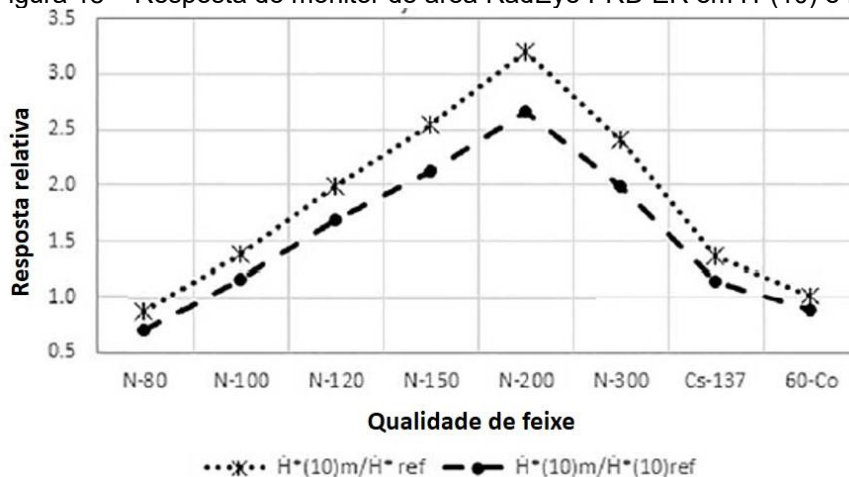
Figura 17 – Resposta do monitor de área *bGeige Nano* em $H^*(10)$ e H^*



Fonte: Čemusová et al (2022, p 1319) (adaptado).

A Figura 18 apresenta os resultados de mais um instrumento avaliado por Čemusová e colaboradores (2022), o *RadEye PRD ER*, que demonstrou superestimação na resposta tanto para $H^*(10)$ quanto para H^* , especialmente nas qualidades de feixe *N-150*, *N-200* e *N-300*, cujas energias médias são de 118 keV, 164 keV e 250 keV, respectivamente. É relevante destacar que, diferentemente do comportamento observado para o *bGeige Nano*, analisado anteriormente, neste caso a pior resposta foi obtida para a qualidade de feixe *N-200*, cuja energia média (164 keV) é consideravelmente mais elevada do que a da qualidade *N-80* (65 keV). Esse resultado evidencia que a discrepância na resposta dos instrumentos não está necessariamente associada apenas às energias mais baixas, mas pode também ocorrer em faixas intermediárias, dependendo das características construtivas e da calibração original do detector.

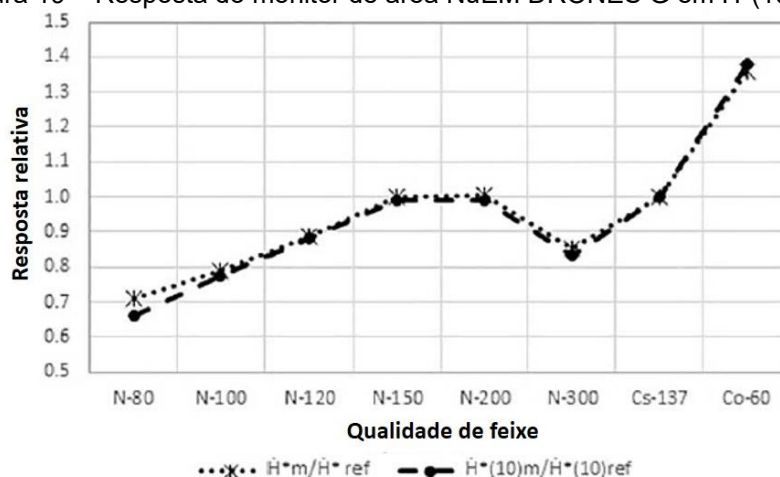
Figura 18 – Resposta do monitor de área *RadEye PRD ER* em $H^*(10)$ e H^*



Fonte: Čemusová et al (2022, p 1319) (adaptado).

Alguns instrumentos podem apresentar uma subestimação da resposta em baixas energias quando avaliados com base na grandeza $H^*(10)$. A substituição por H^* , conforme proposto pela ICRU 95 (2020), pode ou não corrigir esse comportamento, a depender das características construtivas e do projeto espectral do detector. A Figura 19 ilustra o desempenho de um instrumento que exibe subestimação da resposta tanto em $H^*(10)$ quanto em H^* , com maior discrepância observada para as qualidades de feixe N-80, N-100, N-120 e N-300, correspondentes a energias médias de aproximadamente 65 keV, 83 keV, 100 keV e 250 keV, respectivamente. Esses resultados reforçam a necessidade de análise individualizada do desempenho energético dos monitores frente às novas grandezas, especialmente em campos com radiação de média e baixa energia.

Figura 19 – Resposta do monitor de área NuEM DRONES G em $H^*(10)$ e H^*



Fonte: Fonte: Čemusová et al (2022, p 1320) (adaptado).

Diante do exposto, torna-se evidente a necessidade de se avaliar sistematicamente o impacto da introdução da nova grandeza operacional, H^* , sobre a resposta de diferentes modelos de monitores de área amplamente utilizados em programas de proteção radiológica. Tal avaliação é essencial para verificar a adequação metrológica desses instrumentos às novas definições, identificar possíveis desvios significativos e subsidiar decisões quanto à recalibração, substituição ou ajustes técnicos nos dispositivos atualmente em uso.

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMRI) vinculado ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O LMRI é um laboratório acreditado segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 (2017), e realiza serviços de calibração com feixes padrões de raios x e gama.

A avaliação da dependência energética dos detectores foi conduzida utilizando dois sistemas de irradiação: uma fonte de radiação gama de césio-137 (Cs-137), instalada no irradiador modelo *STS OB 85/3*, e feixes padrões de raios X gerados pelo equipamento *Gulmay GX320*, utilizado para calibrações com radiação de baixa e média energia.

O irradiador *OB 85/3* (Figura 20) abriga uma fonte de Cs-137 que fornece uma *Taxa de Kerma* no ar de 26,0 mGy/h a 1 a uma distância de 1,00 m, conforme data de referência de 31/01/2024. O arranjo experimental inclui uma trena calibrada para posicionamento preciso e três absorvedores de chumbo (com diferentes espessuras) que podem ser combinados para reduzir obter diferentes valores de *Taxa de Kerma*. No interior da sala do irradiador, foi instalado um termo-higrômetro digital (Testo, modelo 608-H1), cuja função é fornecer os parâmetros ambientais necessários para o cálculo do Fator de Correção de Temperatura e Pressão (FTP), aplicado às medições realizadas com câmaras de ionização não seladas, conforme Equação 9 (ISO 4037-2, 2019).

$$F_{T,p} = \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0} \quad (9)$$

Onde:

P_0 : Pressão de referência (101,325 kPa).

T_0 : Temperatura de referência (293,15 K).

P : Pressão durante as medidas.

T : Temperatura durante as medidas.

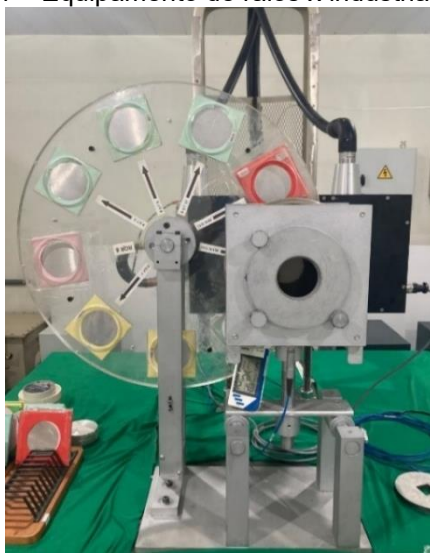
Figura 20 – Irradiador OB 85/3 do LMRI



Fonte: O autor.

O equipamento de raios x industrial *Gulmay* (Figura 21), utilizado neste estudo, possui capacidade de operação até 320 kV e está equipado com uma ampola com ânodo de tungstênio angulado a 24° . Há também um sistema de colimação e uma câmara de transmissão de fabricação *PTW* (modelo *TN 34014*) acoplada a um eletrômetro fabricado pela *Keithley* (modelo *6517A*) que foram utilizados para corrigir os valores de *Taxa de Kerma* no ar de referência obtidos na dosimetria. Além disso, uma trena calibrada é utilizada para posicionamento exato dos instrumentos em relação ao foco da ampola. Para aplicação do FTP nas leituras das câmaras de ionização não seladas através da Equação 9, foi empregado um termo-higrômetro *Testo* (modelo *608-H1*), instalado na sala de irradiação.

Figura 21 – Equipamento de raios x industrial do LMRI



Fonte: O autor.

Nos casos em que foi necessário aplicar a correção da leitura do instrumento por meio do Fator de Temperatura e Pressão (FTP), o valor da pressão atmosférica foi obtido com o auxílio de um barômetro da marca *DPI* (modelo 141), localizado na sala de comando tanto do irradiador quanto do equipamento de raios X.

Neste estudo, foram utilizadas as qualidades de feixe *S-Cs* e *ISO N* (variando de *N-30* a *N-200*), conforme definidas na norma ISO 4037-3 (2019) e implementadas no LMRI. Os valores de *Taxa de Kerma* de referência para cada uma dessas qualidades foram obtidos através do resultado da dosimetria do laboratório que utiliza uma câmara de ionização padrão fabricada pela *PTW* (modelo *TW32002*) e acoplada a um eletrômetro fabricação *PTW* (modelo *Unidos E*). O certificado de calibração dessa câmara padrão possui rastreabilidade metrológica junto ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), localizado no Rio de Janeiro, Brasil.

Foram avaliadas as respostas em $H^*(10)$ e em H^* de 20 *Geiger Mullers* e 2 câmaras de ionização, tanto para a radiação gama do Cs-137 quanto para as qualidades de raios x do tipo *ISO N* implementadas no LMRI. As especificações (fabricante, modelo, grandeza de medição e faixa de energia) de cada detector avaliado estão descritas na Tabela 1 e a Figura 22 mostra a foto de cada um deles.

A resposta (R) de todos os monitores de área avaliados foi obtida, para cada qualidade de radiação, através da razão entre a média de 5 leituras (LI) indicadas por cada um deles em um ponto específico, e a taxa de dose de referência para aquele ponto ($\dot{H}^*(10)$ ou $\dot{H}^*$), como está descrito nas Equações 10 e 11.

$$R_{H^*(10)} = \frac{LI}{\dot{H}^*(10)} \quad (10)$$

$$R_{H^*} = \frac{LI}{\dot{H}^*} \quad (11)$$

Os valores de taxa de dose de referência ($\dot{H}^*(10)$ ou $\dot{H}^*$) foram obtidos através do produto entre a *Taxa de Kerma* ($\dot{K}$), obtida na dosimetria do laboratório, e os coeficientes de conversão ($h^*(10)$ ou h^*) disponíveis na ISO 4037-3 (2019) para $H^*(10)$ e em Behrens e Otto (2022) para H^* , conforme Equação 12 e Equação 13.

$$\dot{H}^*(10) = \dot{K} \times h^*(10) \quad (12)$$

$$\dot{H}^* = \dot{K} \times h^* \quad (13)$$

As leituras dos equipamentos que operam em *Taxa de Exposição* foram corrigidas para $\dot{K}_{ar}$ através da equação 14.

$$\dot{K}_{ar} = LI \times FC \quad (14)$$

Onde:

$\dot{K}_{ar}$: Leitura corrigida para Kerma no Ar (mGy/h).

LI : Leitura do instrumento em R/h.

FC : Fator de conversão de $8,76 \times 10^{-3}$ Gy/R.

Tabela 1 – Especificações dos monitores de área avaliados

Fabricante	Modelo	Grandeza	Energia (keV)
Fluke Biomedical	Inovision 451P	Equivalente de Dose	Acima de 25
Fluke Biomedical	451P-DE-SI-RYR	H*(10)	Acima de 25
Arrow-Tech	Dosimeter 3009 A	Equivalente de Dose	Não disponível
Graetz	X 50 DE	H*(10)	40 – 1300
Graetz	GPD 100	Equivalente de Dose	48 – 2000
Victoreen	190 I	Taxa de Exposição	Acima de 25
Ludlum	MOD 3	Taxa de Exposição	60 – 1300
Thermo Scientific™	FH 40 G-10	H*(10)	30 – 4400
Thermo Scientific™	FH 40G-L10Ω	H*(10)	30 – 4400
Thermo Scientific™	RadEye B20-ER	H*(10)	17 – 3000
Thermo Scientific™	RadEye G-10	H*(10)	50 – 3000
Thermo Scientific™	RadEye G-10Ex	H*(10)	50 – 3000
Automess	6150 AD 6/H	H*(10)	60 – 1300
MRA	MIR 7028	H*(10)	Não disponível
Ecotest	Terra-P+	H*(10)	50 – 3000
RadInstruments	MGP-101	H*(10)	50 – 1300
Mirion	RDS-32 WR	H*(10)	55 – 1800
Ecotest	Terra-P	H*(10)	50 – 3000
Tracerco	T202-A-4	H*(10)	59 – 1332
Bertin	MG-S10S	H*(10)	45 – 3000
Automess	6150 AD-18/H	H*(10)	65 – 1300
RADOS	RDS-30	H*(10)	48 – 1300

Fonte: O autor (2025).

Figura 22 – Fotos dos monitores de área avaliados



Fonte: O autor (2025).

A resposta (R) de todos os monitores de área avaliados foi obtida, para cada qualidade de radiação, através da razão entre a média de 5 leituras (LI) indicadas por cada um deles em um ponto específico, e a taxa de dose de referência para aquele ponto ($\dot{H}^*(10)$ ou $\dot{H}^*$), como está descrito nas Equações 10 e 11.

$$R_{H^*(10)} = \frac{LI}{\dot{H}^*(10)} \quad (10)$$

$$R_{H^*} = \frac{LI}{\dot{H}^*} \quad (11)$$

Os valores de taxa de dose de referência ($\dot{H}^*(10)$ ou $\dot{H}^*$) foram obtidos através do produto entre a *Taxa de Kerma* ($\dot{K}$), obtida na dosimetria do laboratório, e os coeficientes de conversão ($h^*(10)$ ou h^*) disponíveis na ISO 4037-3 (2019) para $H^*(10)$ e em Behrens e Otto (2022) para H^* , conforme Equação 12 e Equação 13.

$$\dot{H}^*(10) = \dot{K} \times h^*(10) \quad (12)$$

$$\dot{H}^* = \dot{K} \times h^* \quad (13)$$

As leituras dos equipamentos que operam em *Taxa de Exposição* foram corrigidas para $\dot{K}_{ar}$ através da equação 14.

$$\dot{K}_{ar} = LI \times FC \quad (14)$$

Onde:

$\dot{K}_{ar}$: Leitura corrigida para Kerma no Ar (mGy/h).

LI : Leitura do instrumento em R/h.

FC : Fator de conversão de $8,76 \times 10^{-3}$ Gy/R.

3.1 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO INSTRUMENTO NO Cs-137

Inicialmente, cada detector foi calibrado na grandeza recomendada pelo fabricante, utilizando o feixe de radiação emitido pela fonte de Cs-137 do irradiador OB 85/3, de acordo com a metodologia descrita na ISO 4037-3 (2019).

Antes da calibração, foi realizada a verificação da tensão das baterias dos instrumentos, assegurando que estivessem dentro da faixa de $\pm 10\%$ do valor nominal especificado pelo fabricante. Nos instrumentos analógicos, também foram inspecionados o ajuste do zero mecânico e, quando aplicável, a tensão de alta voltagem. Em seguida, os detectores foram posicionados no centro geométrico do feixe, com o tubo Geiger corretamente alinhado, e uma câmera de vídeo foi instalada para visualização do visor do instrumento durante a medição.

O processo de calibração considerou três valores de *Taxa de Equivalente de Dose Ambiente*, $\dot{H}^*(10)$: 10 $\mu\text{Sv/h}$, 100 $\mu\text{Sv/h}$, e 1000 $\mu\text{Sv/h}$. A calibração foi realizada através da aquisição de 10 leituras a 20%, 50% e 80% de cada um desses valores (através da variação da distância fonte-detector e diferentes combinações de absorvedores de chumbo) para verificar a linearidade da resposta do instrumento.

As distâncias correspondentes a cada valor de $\dot{H}^*(10)$, utilizados na calibração, foram determinadas pelo método do campo conhecido, utilizando como base os valores de *Taxa de Kerma no Ar* obtidos na dosimetria do feixe, corrigidos pelo decaimento radioativo (conforme apresentado na Tabela 2), e multiplicados pelo fator de conversão de 1,21 Sv/Gy, conforme especificado na ISO 4037-3 (2019).

Ao final da calibração, esperava-se que a média das 10 leituras estivesse dentro dos seguintes critérios de aceitação: $\pm 10\%$ do valor de referência para os pontos centrais da escala e $\pm 20\%$ para os extremos. Sempre que os resultados ultrapassavam esses limites, o instrumento era ajustado (quando possível) e recalibrado.

Por fim, a resposta do instrumento no Cs-137, em $H^*(10)$, foi obtida por meio da razão entre a média das 10 leituras e o valor referência de $\dot{H}^*(10) = 50 \mu\text{Sv/h}$, conforme a Equação 10. De forma análoga, a resposta, em H^* , foi obtida através da razão entre a média das 10 leituras e o valor de $\dot{H}^*$ para o mesmo ponto, conforme a Equação 11.

Tabela 2 – Valores de $\dot{H}^*(10)$ corrigidos pelo decaimento em 31/01/2024

Absorvedores	Espessura (cm)	Taxa de $H^*(10)$ (mSv/h)
Sem absorvedor	0	31,46
Absorvedor 2	2,2	2,32
Absorvedor 3	1,8	3,73
Absorvedor 4	3,3	0,36
Absorvedor 2+3	4,0	0,30
Absorvedor 3+4	5,1	0,05
Absorvedor 2+4	5,5	0,03

Fonte: O autor (2025).

3.2 AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO INSTRUMENTO NO RAIOS X

Antes do posicionamento dos detectores no equipamento de raios X, foi verificada a tensão das baterias, assegurando-se que estivesse dentro da faixa de $\pm 10\%$ do valor especificado pelo fabricante. Para os instrumentos analógicos, também foram checadas a posição do zero mecânico e a tensão de alta voltagem, quando aplicável.

Os detectores foram então posicionados no setup de irradiação a uma distância fixa de 2,5 metros entre o ponto focal do tubo de raios X e o centro geométrico do volume sensível do detector.

Para cada qualidade de feixe *ISO-N* avaliada, foram realizadas cinco leituras consecutivas, seguidas pela medição com a câmara de ionização monitora. A média das cinco leituras da câmara monitora foi corrigida pelo *FTP*, sendo este valor utilizado para corrigir a taxa de referência correspondente àquela qualidade de feixe.

A resposta do instrumento, em $H^*(10)$, foi calculada pela razão entre a média das 5 leituras obtidas e o valor de referência de $\dot{H}^*(10)$ para cada qualidade de feixe utilizada, conforme apresentado na Equação 10. De forma análoga, a resposta do instrumento em H^* foi obtida por meio da razão entre a média das 5 leituras e o valor de referência da grandeza $\dot{H}^*$ para as mesmas qualidades, conforme a Equação 11.

3.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INTRODUÇÃO DE H^*

Como os monitores de área normalmente são calibrados na fonte de Cs-137, a resposta do instrumento em cada energia média de feixe utilizada foi normalizada pela resposta na energia da radiação gama do Cs-137, tanto em $H^*(10)$ quanto em H^* . Esse procedimento permite avaliar, para cada energia média das qualidades de

feixe utilizadas, o grau de superestimação ou subestimação da resposta do instrumento em relação à condição padrão de calibração.

Para estimar o impacto decorrente da introdução da nova grandeza operacional H^* , analisou-se se a resposta relativa dos instrumentos, em cada energia avaliada, encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela norma IEC 60846-1 (2009). Apesar desses limites terem sido definidos originalmente para a grandeza $H^*(10)$, eles foram adotados provisoriamente também para a avaliação de H^* , uma vez que ainda não há critérios normativos específicos estabelecidos para essa nova grandeza.

A Tabela 3 apresenta as qualidades de feixe utilizadas neste estudo, com suas respectivas energias médias, camadas semirredutoras (CSR) e os coeficientes de conversão $h^*(10)$ e h^* , correspondentes às grandezas operacionais $H^*(10)$ e H^* , respectivamente.

Tabela 3 – Valores de energia média e coeficientes de conversão para $H^*(10)$ e H^*

Qualidade do Feixe	Energia Média (keV)	1ª CSR (mm)	$\dot{K}$ (mGy/h)	$h^*(10)$ (Sv/Gy)	h^* (Sv/Gy)
ISO N-30	24	1,21 Al	1,93	0,814	0,2381
ISO N-40	33	2,76 Al	1,04	1,20	0,525
ISO N-60	48	0,24 Cu	1,95	1,59	1,0139
ISO N-80	65	0,58 Cu	0,90	1,74	1,3639
ISO N-100	83	1,13 Cu	0,48	1,71	1,4256
ISO N-120	100	1,72 Cu	0,53	1,65	1,3933
ISO N-150	118	2,37 Cu	3,93	1,58	1,3369
ISO N-200	164	3,86 Cu	1,26	1,46	1,2148
S-Cs	662	---	31,46	1,21	1,0158

Fonte: ISO 4037-3 (2019); Behrens e Otto (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da dependência energética obtida para cada monitor de área avaliado são apresentados a seguir por meio de gráficos que relacionam a resposta do instrumento, normalizada para a radiação gama do Cs-137, nas grandezas $H^*(10)$ e H^* , em função da energia média da radiação utilizada. Nos gráficos, as linhas sólidas interligando os pontos têm apenas a função de guiar a visualização, enquanto as linhas pretas tracejadas representam os limites definidos na IEC 60846-1 (2009) para a dependência energética que variam de -29% a +67% (ou 0,71 a 1,67). A área sombreada indica a faixa de energia recomendada pelo fabricante do instrumento.

Com base nos resultados obtidos, os instrumentos avaliados puderam ser classificados em quatro grupos distintos, de acordo com a resposta apresentada por eles. O primeiro grupo inclui os que não responderam bem em $H^*(10)$ e tiveram ou não a resposta corrigida após a introdução de H^* . O segundo reúne os que apresentaram uma superestimação acentuada da resposta em energias menores que 50 keV e acabaram não respondendo bem em H^* para algumas energias. O terceiro abrange os que apresentaram uma queda acentuada de sensibilidade em energias menores que 50 keV e tiveram pouca variação da resposta nessa faixa após a introdução de H^* . O quarto e último engloba os que não se enquadram em nenhum dos três grupos anteriores.

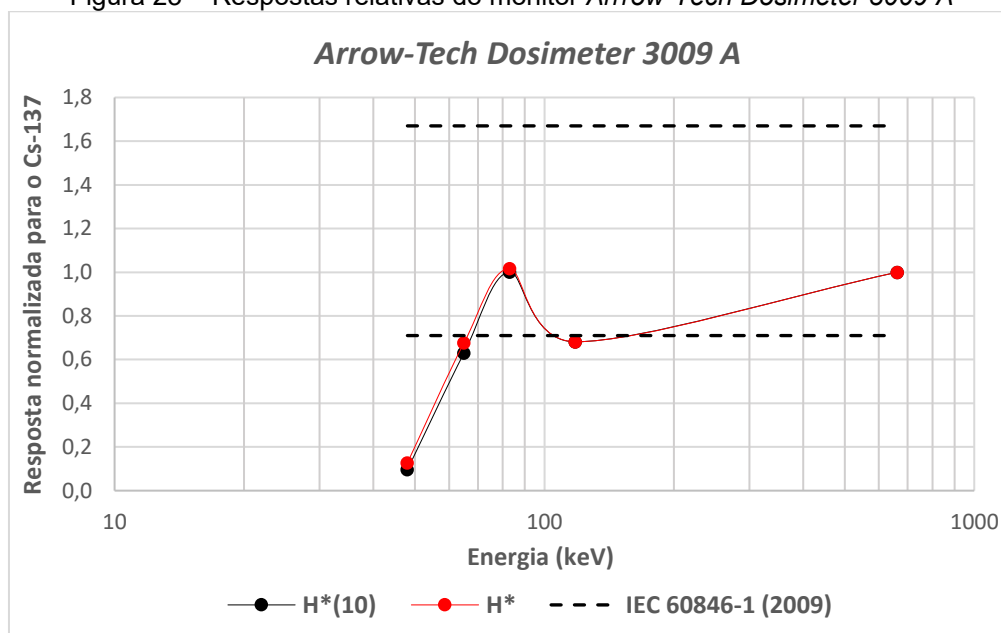
No caso específico dos monitores *Arrow-Tech Dosimeter 3009 A*, *Graetz X 50 DE*, *Graetz GPD 100*, *Ludlum mod 3*, *Fluke Biomedical Inovision 451P*, *Tracerco T202-A-4*, *MRA MIR 7028*, foram observadas respostas relativas fora dos limites estabelecidos pela IEC 60846-1 (2009) para $H^*(10)$. Esse resultado corrobora com o observado por Čemusová e colaboradores (2022), que também identificaram instrumentos com desempenho insatisfatório nessa grandeza. Com exceção do *Arrow-Tech Dosimeter 3009 A*, os 6 monitores restantes apresentaram melhoria na dependência energética após a introdução de H^* , corrigindo parcialmente respostas subestimadas em $H^*(10)$. Esse achado está em conformidade com o *EURADOS Report 2022-02* (EURADOS, 2022), no qual se destaca que o aumento na resposta provocado pela adoção de H^* , pode ser benéfico para determinados instrumentos.

O gráfico da Figura 23 mostra que a resposta relativa do *Arrow-Tech Dosimeter 3009 A* ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009),

tanto para $H^*(10)$ quanto para H^* , nas energias de 48 keV, 65 keV e 118 keV. A pior resposta foi para a energia de 48 keV que apresentou uma subestimação de 0,10 para $H^*(10)$ e 0,13 para H^* .

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Arrow-Tech Dosimeter 3009 A* precisaria ser fisicamente adaptado para corrigir a dependência energética nas energias supracitadas e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas.

Figura 23 – Respostas relativas do monitor *Arrow-Tech Dosimeter 3009 A*



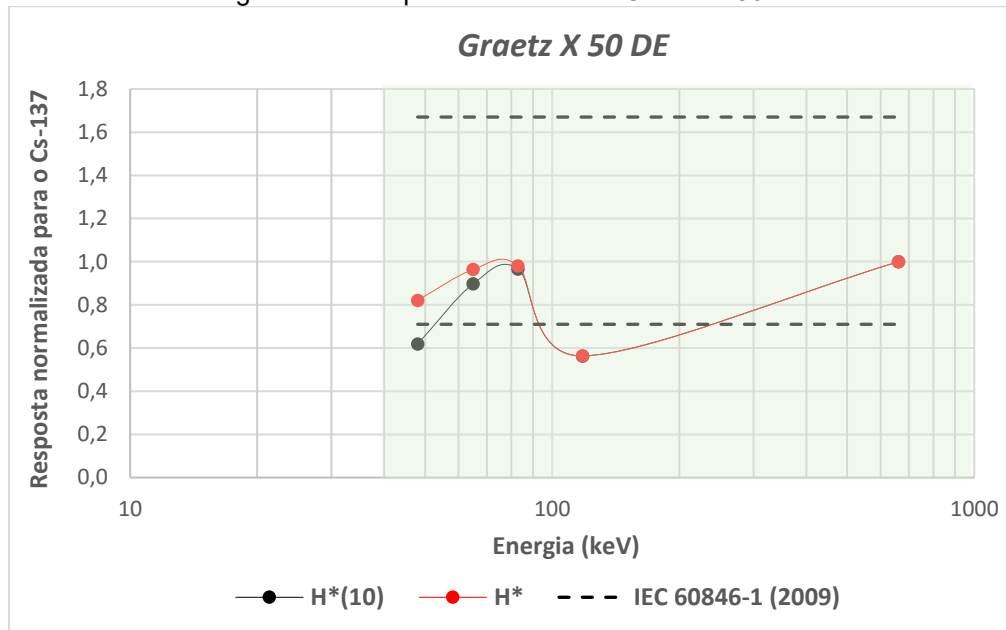
Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 24 mostra que a resposta relativa do *Graetz X 50 DE*, em $H^*(10)$, ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para as energias de 48 keV e 118 keV. A resposta relativa para a energia de 48 keV estava sendo subestimada em 0,62 e passou a ficar dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) após a introdução de H^* , com uma resposta relativa de 0,82. Em relação a energia de 118 keV, o instrumento apresentou uma resposta de 0,56, tanto para $H^*(10)$ quanto para H^* , e continuou fora dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Graetz X 50 DE* precisaria ser fisicamente adaptado para corrigir a dependência energética na energia de 118 keV e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas.

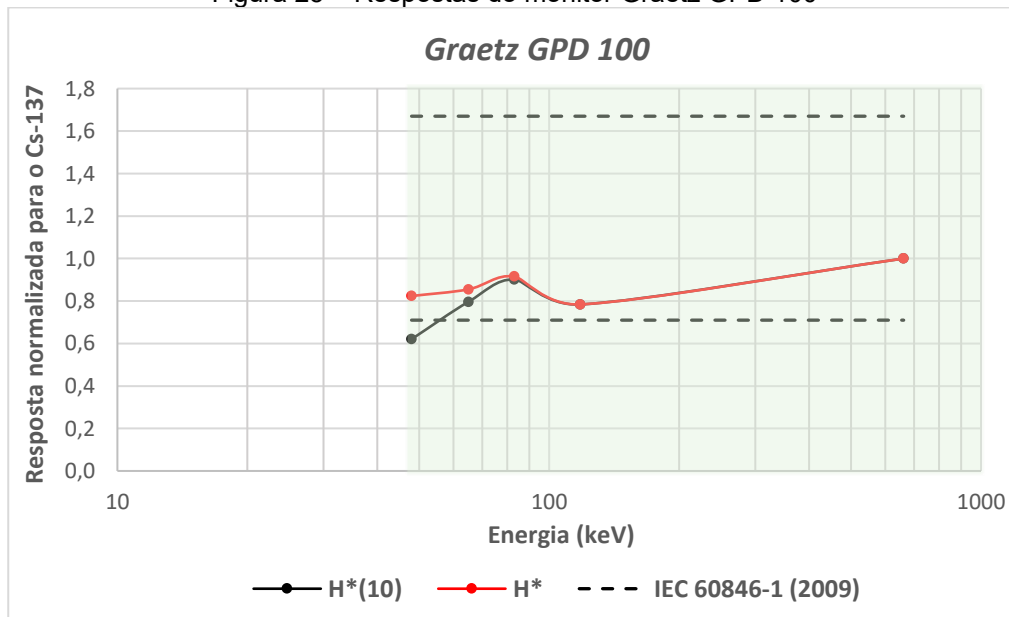
O gráfico da Figura 25 mostra que a resposta relativa do *Graetz GPD 100*, em $H^*(10)$, ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para a energia de 48 keV. A resposta relativa nessa energia estava sendo subestimada em 0,62 e passou a ficar dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) após a introdução de H^* , com uma resposta relativa de 0,80. Em relação as demais energias testadas, a resposta relativa do instrumento continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) com uma leve melhora em 65 keV e 83 keV.

Figura 24 – Respostas do monitor Graetz X 50 DE



Fonte: O autor (2025)

Figura 25 – Respostas do monitor Graetz GPD 100



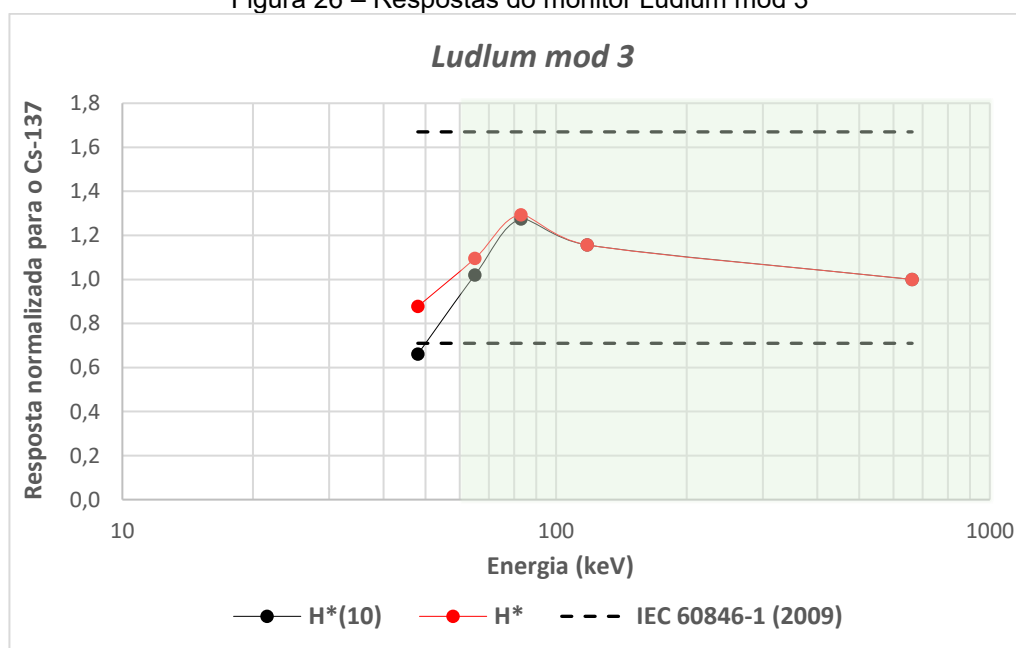
Fonte: O autor (2025)

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Graetz GPD 100* precisaria apenas ser recalibrado em H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas.

O gráfico da Figura 26 mostra que a resposta relativa do *Ludlum mod 3*, em $H^*(10)$, ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para a energia de 48 keV. A resposta relativa nessa energia estava sendo subestimada em 0,66 e passou a ficar dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009 após a introdução de H^* , com uma resposta relativa de 0,88. Em relação as demais energias testadas, a resposta do instrumento continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) com uma leve piora em 65 keV e 83 keV.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Ludlum mod 3* precisaria apenas ser recalibrado em H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas.

Figura 26 – Respostas do monitor Ludlum mod 3



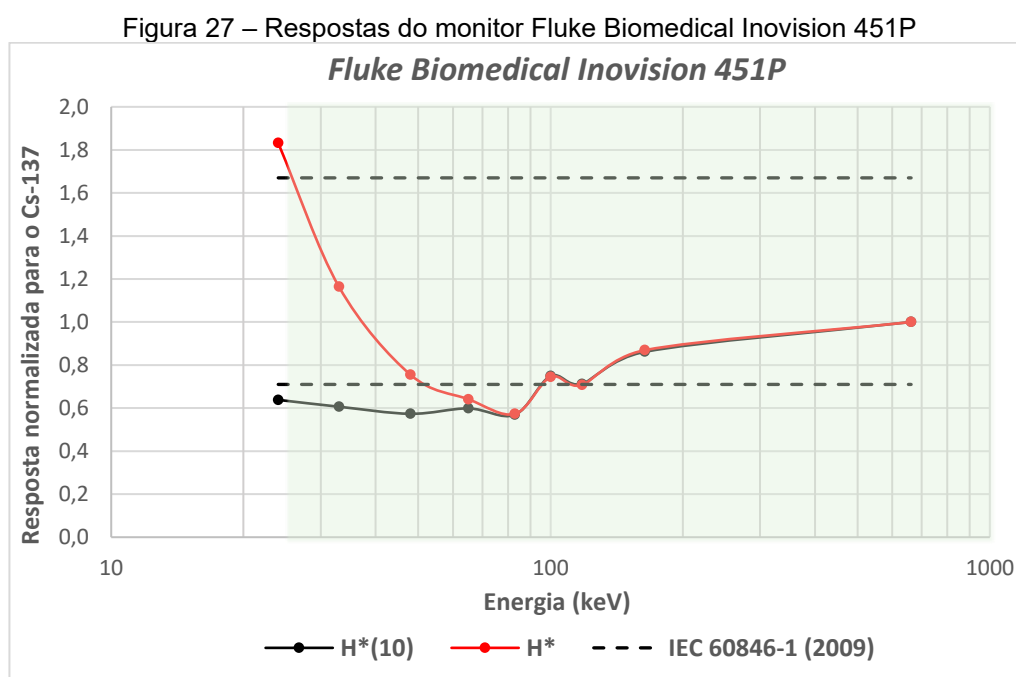
Fonte: O autor (2025)

Os instrumentos *Fluke Biomedical Invision 451P*, *Fluke 451P-DE-SI-RYR*, *Thermo FH 40 G-10*, *Thermo FH 40G-L 10 Ω* e *Thermo RadEye B20-ER* apresentaram uma superestimação acentuada em energias menores que 50 keV que piorou e/ou melhorou a resposta relativa deles após a introdução de H^* . Esse resultado está de acordo com o que observou Otto (2019) devido a sensibilidade de

baixa energia necessária para modelar a dependência energética em $H^*(10)$. Ou seja, para energias menores que 50 keV, o valor de $H^*(10)$ é muito maior que o de H^* (Otto, 2019).

O gráfico da Figura 27 mostra que a resposta relativa da *Fluke Biomedical Inovision 451P* em $H^*(10)$, ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para as energias de fótons avaliadas na faixa de 24 keV a 83 keV. A introdução de H^* gerou uma superestimação excessiva na energia de 24 keV, mas essa energia está fora da faixa recomendada pelo fabricante. As respostas relativas em $H^*(10)$, para as energias de 33 keV e 48 keV, apresentavam subestimções de 0,61 e 0,57, respectivamente. Contudo, após a introdução de H^* , essas respostas relativas passaram a ficar dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) com 1,16 para 33 keV e 0,76 para 48 keV. A melhora apresentada, por sua vez, não foi suficiente para corrigir a subestimação existente em 65 keV e 83 keV pois as respostas em H^* continuaram subestimadas em 0,64 e 0,57, respectivamente.

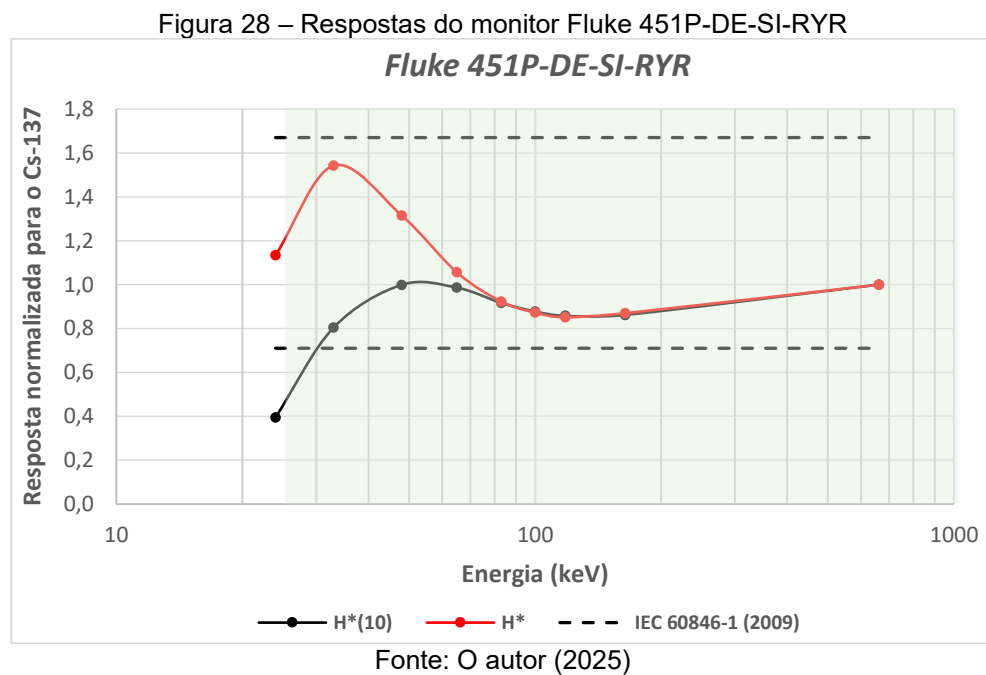
Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Inovision 451P* precisaria ser fisicamente adaptado para corrigir a dependência energética nas energias de 65 keV e 83 keV e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante.



Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 28 mostra que a resposta relativa da *Fluke 451 P-DE-SI-RYR*, em $H^*(10)$, ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) apenas para a energia de 24 keV. Todavia, essa energia está fora da faixa recomendada pelo fabricante. A resposta relativa para a energia de 24 keV estava sendo subestimada em 0,40 e passou a ficar dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), após a introdução de H^* , com uma resposta relativa de 1,13. Em relação as demais energias testadas, a resposta do instrumento continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) apesar da piora apresentada em 33 keV, 48 keV e 65 keV.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Fluke 451 P-DE-SI-RYR* precisaria apenas ser recalibrado em H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 24 keV.

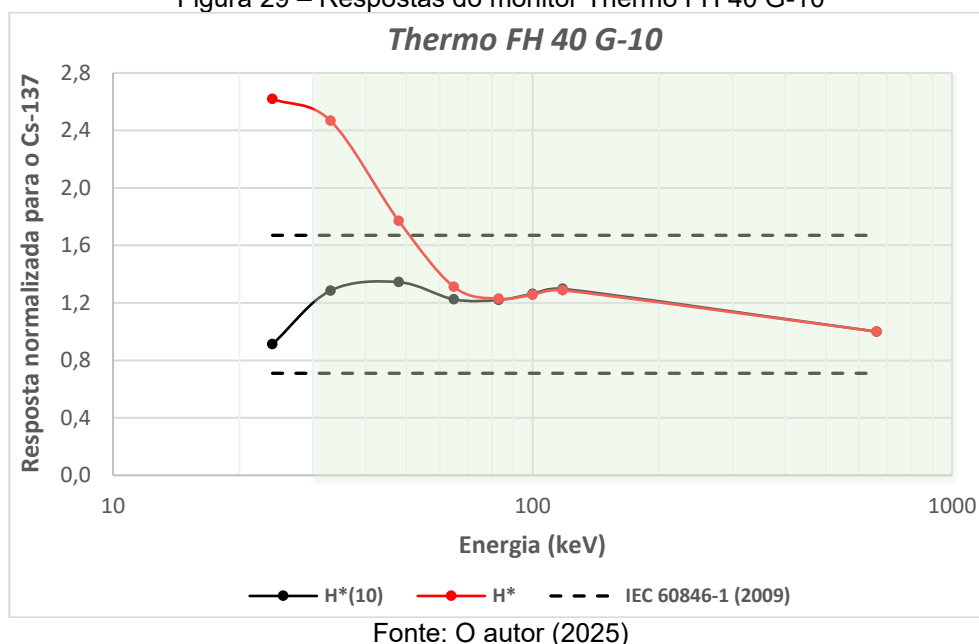


O gráfico da Figura 29 mostra que a resposta relativa do *Thermo FH 40 G 10*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias testadas. A introdução de H^* , gerou uma superestimação excessiva que piorou a resposta relativa do instrumento nas energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. A resposta relativa para as energias de 33 keV e 48 keV passaram de 1,29 e 1,34 em $H^*(10)$ para 2,47 e 1,77 em H^* , respectivamente. Assim, o

instrumento passou a responder fora dos limites da IEC 60846-1 (2009) nessas energias. Em relação as demais energias testadas, a resposta do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), exceto para 24 keV. Contudo, essa energia de fóton está fora da faixa recomendada pelo fabricante.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Thermo FH 40 G-10* precisaria ser fisicamente adaptado para corrigir a dependência energética nas energias de 33 keV e 48 keV e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

Figura 29 – Respostas do monitor Thermo FH 40 G-10

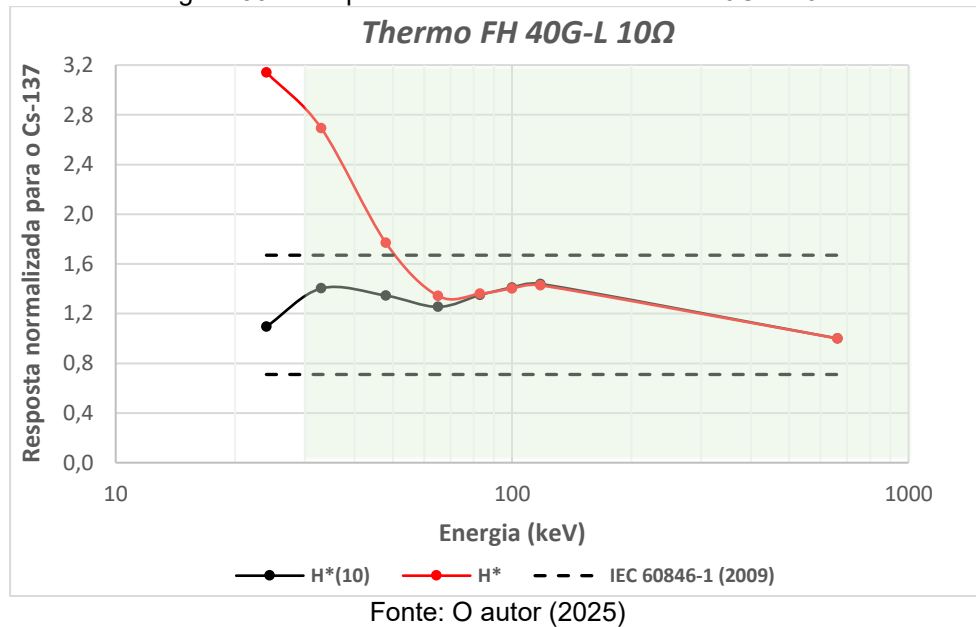


O gráfico da Figura 30 mostra que a resposta relativa do *Thermo FH 40 G-L 10 Ω* , em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias testadas. A introdução de H^* , gerou uma superestimação excessiva que piorou a resposta do instrumento para energias de fótons de 24 keV, 33 keV e 48 keV. As respostas relativas para as energias de 33 keV e 48 keV passaram de 1,40 e 1,35 em $H^*(10)$ para 2,69 e 1,77 em H^* , respectivamente. Assim, o instrumento passou a responder fora dos limites da IEC 60846-1 (2009) nessas energias. Em relação as demais energias testadas, a resposta do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), exceto para 24 keV. Contudo, essa energia está fora da faixa recomendada pelo fabricante.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Thermo FH 40G-L 10 Ω* precisaria ser fisicamente adaptado para corrigir a dependência energética nas

energias de 33 keV e 48 keV e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

Figura 30 – Respostas do monitor Thermo FH 40G-L 10 Ω



O gráfico da Figura 31 mostra que a resposta relativa do *Thermo RadEye B20-ER*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias testadas. A introdução de H^* , gerou uma superestimação excessiva que piorou a resposta do instrumento nas energias de 24 keV e 33 keV. As respostas relativas para as energias de 24 keV e 33 keV passaram de 0,97 e 0,95 em $H^*(10)$ para 2,78 e 1,83 em H^* , respectivamente. Assim, o instrumento passou a responder fora dos limites da IEC 60846-1 (2009) nessas energias. Em relação as demais energias testadas, a resposta relativa do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), apesar de ter havido uma piora em 48 keV e uma melhora em 65 keV.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Thermo RadEye B20-ER* precisaria ser fisicamente adaptado para corrigir a dependência energética nas energias de 24 keV e 33 keV e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

O gráfico da Figura 32 mostra que a resposta relativa do *Victoreen 190 I*, em $H^*(10)$ e H^* , ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias de testadas. A introdução de H^* impactou significativamente a resposta do instrumento na energia de 48 keV que passou de 1,00 em $H^*(10)$ para

1,32 em H^* . Apesar do aumento observado, essa resposta ainda ficou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009). Em relação as demais energias testadas, a resposta do instrumento continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) com uma leve melhora para as energias de 65 keV e 83 keV.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Victoreen 190 I* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas.

Figura 31 – Respostas do monitor *Thermo RadEye B20-ER*

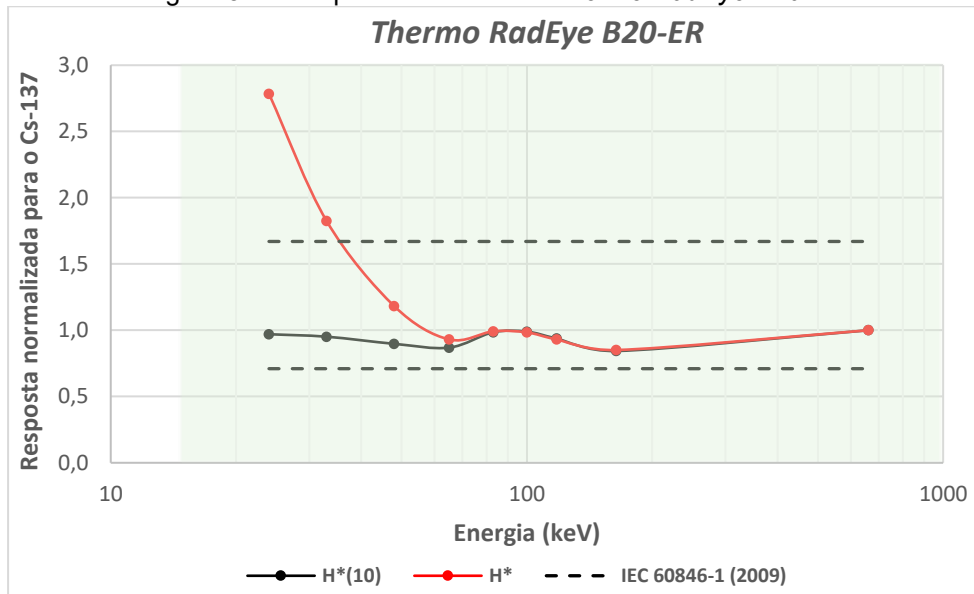
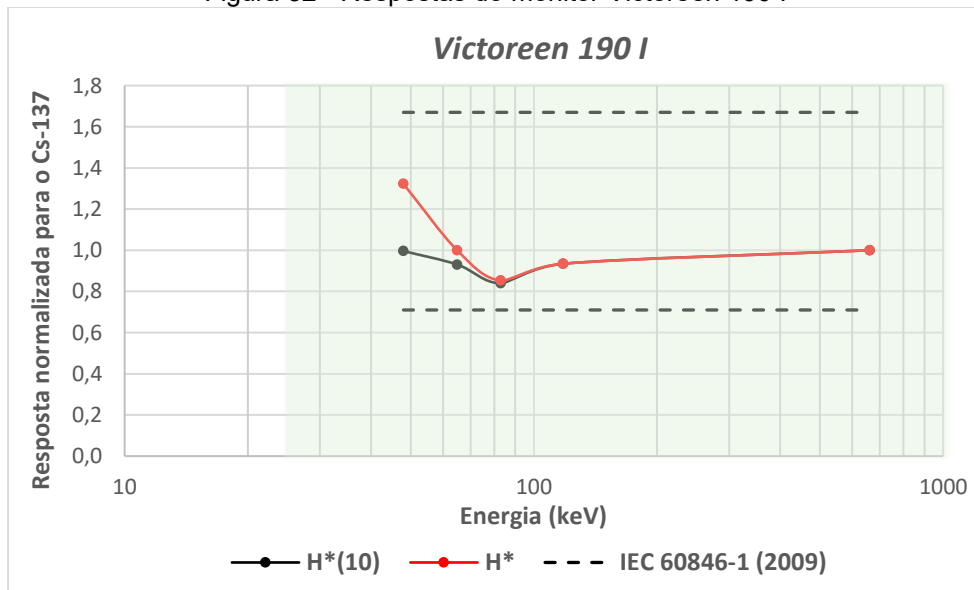


Figura 32 - Respostas do monitor *Victoreen 190 I*



Os instrumentos *Automess 6150 AD 6/H*, *Thermo RadEye G-10Ex*, *Thermo RadEye G-10*, *Mirion RDS-32 WR*, *Ecotest Terra P*, *Tracerco T202-A-4*, *Bertin MG-S10S*, *Automess 6150 AD 18/H*, *Ecotest Terra P+*, *Rad Instruments MGP-101* e *RADOS RDS-30* apresentaram uma queda acentuada de sensibilidade em baixas energias ($E < 50$ keV) que fez com que a dependência energética deles se tornasse praticamente insensível a fortes variações de H^* . Esse resultado está de acordo com o que observou Otto (2019). Ainda assim, esses instrumentos, com exceção do *Ecotest Terra P*, *Tracerco T202-A-4* e *Rad Instruments MGP-101*, apresentaram melhoras nas respostas que possibilitaria ampliar a faixa de energia de operação deles em H^* .

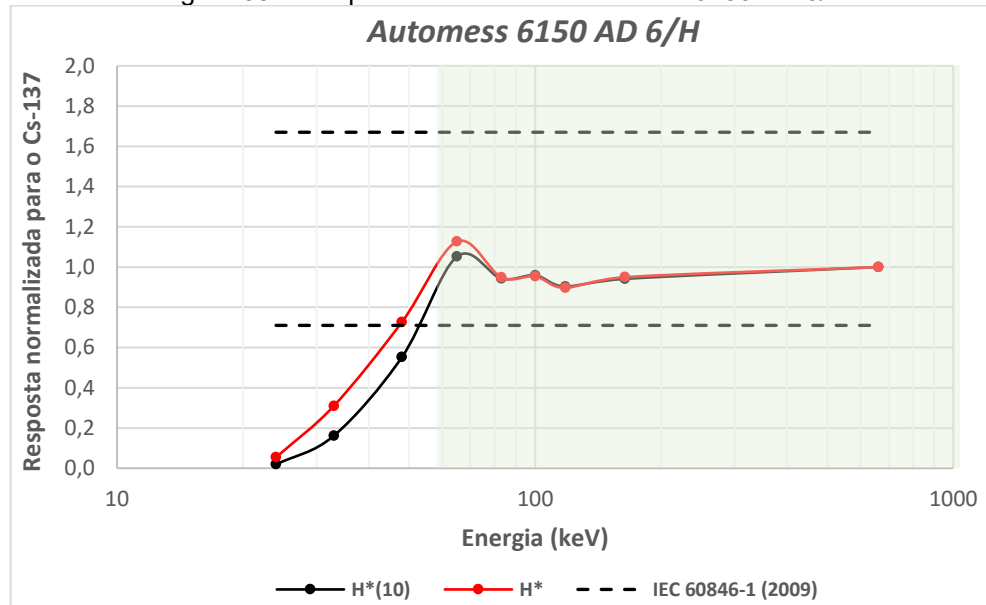
O gráfico da Figura 33 mostra que a resposta relativa do *Automess 6150 AD 6/H*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias testadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante. Apesar da queda na sensibilidade em energias menores que 50 keV, a introdução de H^* melhorou a resposta relativa do instrumento nas energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. O maior impacto foi para a energia de 48 keV onde a resposta relativa estava sendo subestimada em 0,55 e passou a ficar dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), com uma resposta relativa de 0,71 após a introdução de H^* . Em relação as demais energias testadas, a resposta do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), exceto para as energias de 24 keV e 33 keV. Contudo, essas energias estão abaixo da faixa recomendada pelo fabricante (região sombreada).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Automess 6150 AD 6/H* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante. Esse resultado está de acordo com o publicado por Otto (2019) e ICRU/ICRP (2020) que avaliaram a resposta, em $H^*(10)$ e H^* , desse mesmo modelo de instrumento. Adicionalmente, esse monitor também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 48 keV.

O gráfico da Figura 34 mostra que a resposta relativa do *Automess 6150 AD 18/H*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) para todas as energias testadas, exceto 24 keV e 33 keV. Contudo, essas energias estão abaixo da faixa recomendada pelo fabricante. A resposta relativa em $H^*(10)$, para a energia de 48 keV, apresentou uma melhora significativa de 0,81 para 1,07 após a

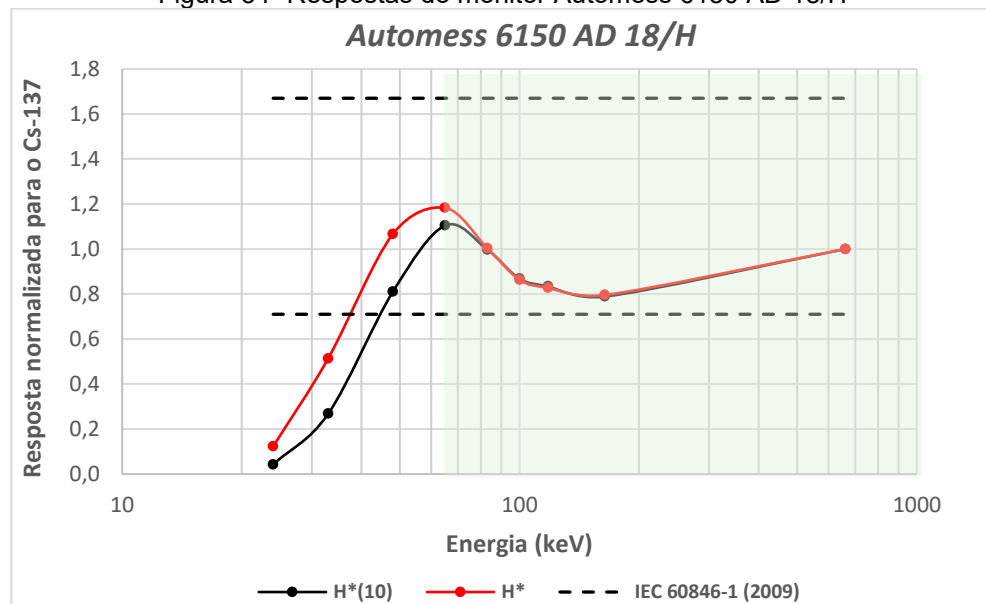
introdução de H^* . Em relação as demais energias, a diminuição ou o aumento na resposta, de $H^*(10)$ para H^* , não foram significativas e a resposta relativa do instrumento continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Figura 33 – Respostas do monitor Automess 6150 AD 6/H



Fonte: O autor (2025)

Figura 34 -Respostas do monitor Automess 6150 AD 18/H



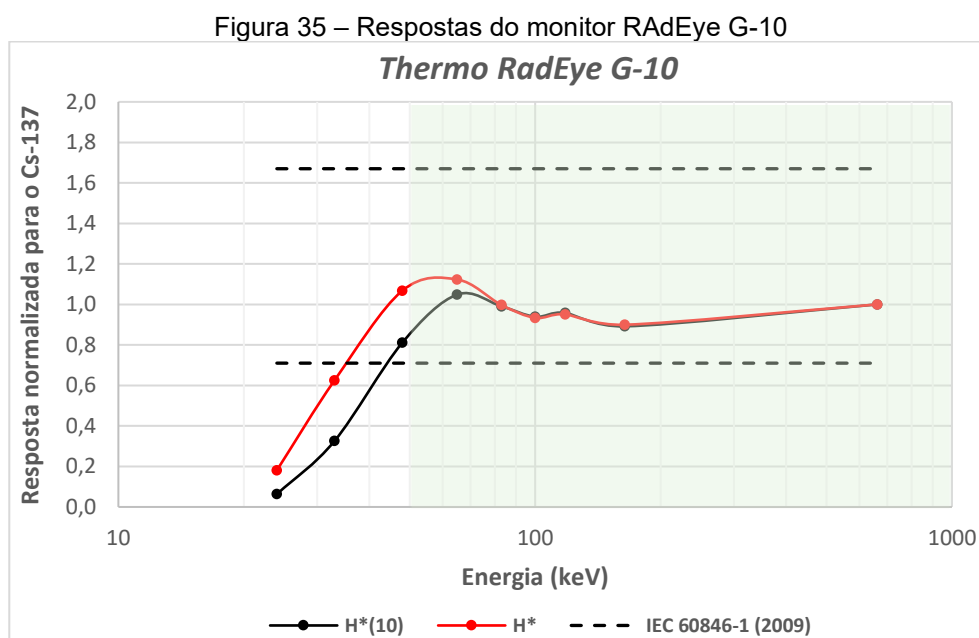
Fonte: O autor (2025)

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Automess 6150 AD 18/H* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa

de energia recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 48 keV.

O gráfico da Figura 35 mostra que a resposta relativa do *Thermo RadEye G-10*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) em todas as energias recomendadas pelo fabricante e para 48 keV. A introdução de H^* , melhorou a resposta relativa nas energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. O impacto mais significativo foi para a energia de 48 keV onde a resposta relativa do instrumento passou de 0,81 em $H^*(10)$ para 1,07 em H^* e continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009). Em relação as demais energias testadas, a resposta relativa do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), exceto para as energias de 24 keV e 33 keV. Contudo, esses valores de energia estão abaixo do recomendado pelo fabricante.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Thermo RadEye G-10* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 48 keV.

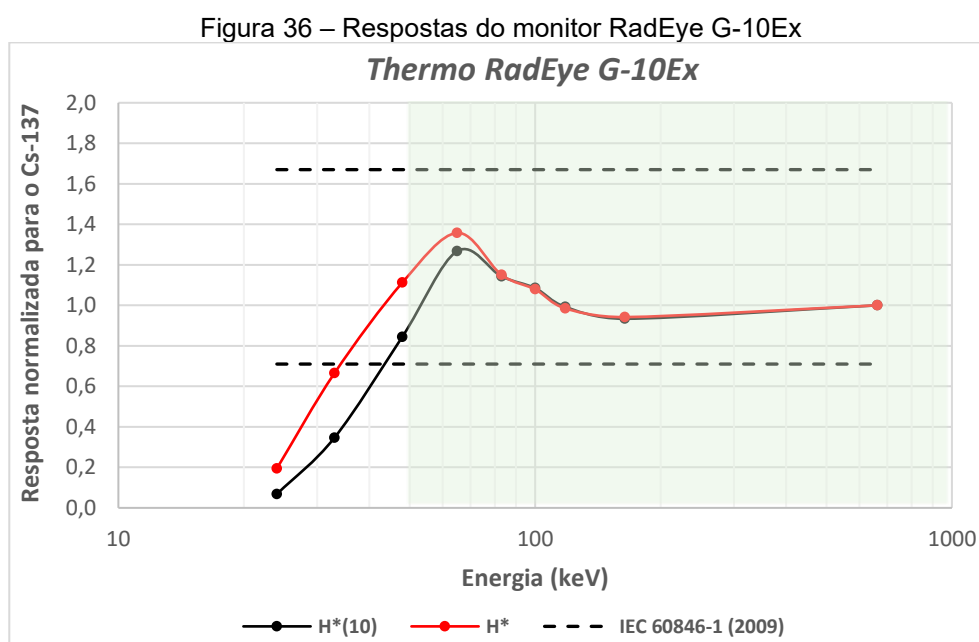


Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 36 mostra que a resposta relativa do *Thermo RadEye G-10Ex*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009)

para as energias avaliadas na faixa recomendada pelo fabricante e para 48 keV. Fora dessa faixa, a introdução de H^* , melhorou a resposta relativa para as energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. O impacto mais significativo foi para a energia de 48 keV onde a resposta passou de 0,84 em $H^*(10)$ para 1,11 em H^* . Em relação as demais energias testadas, a resposta relativa do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), exceto para as energias de 24 keV e 33 keV. Contudo, esses valores estão abaixo do recomendado pelo fabricante.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Thermo RadEye G-10 Ex* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 48 keV.

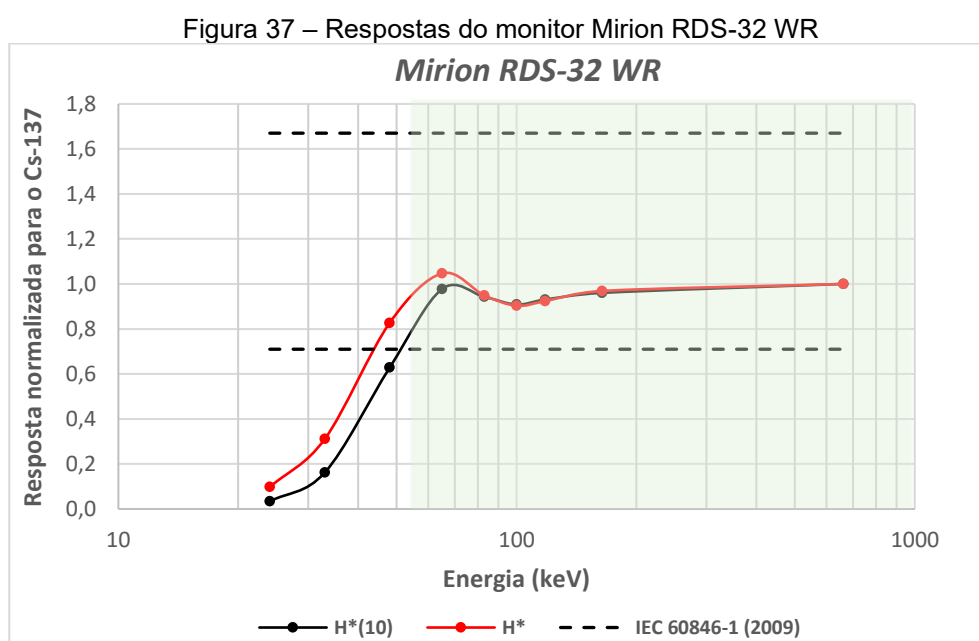


Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 37 mostra que a resposta relativa do *Mirion RDS-32 WR*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias avaliadas na faixa recomendada pelo fabricante. Fora dessa faixa, a introdução de H^* , melhorou a resposta relativa para as energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. O impacto mais significativo foi para a energia de 48 keV onde a resposta passou de 0,62 em $H^*(10)$ para 0,82 em H^* e o instrumento passou a responder dentro limites da IEC 60846-1 (2009). Em relação as demais energias testadas, a

resposta relativa do instrumento, em H^* , continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009), exceto para as energias de 24 keV e 33 keV. Contudo, esses valores estão abaixo do recomendado pelo fabricante.

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Mirion RDS-32 WR* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 48 keV.



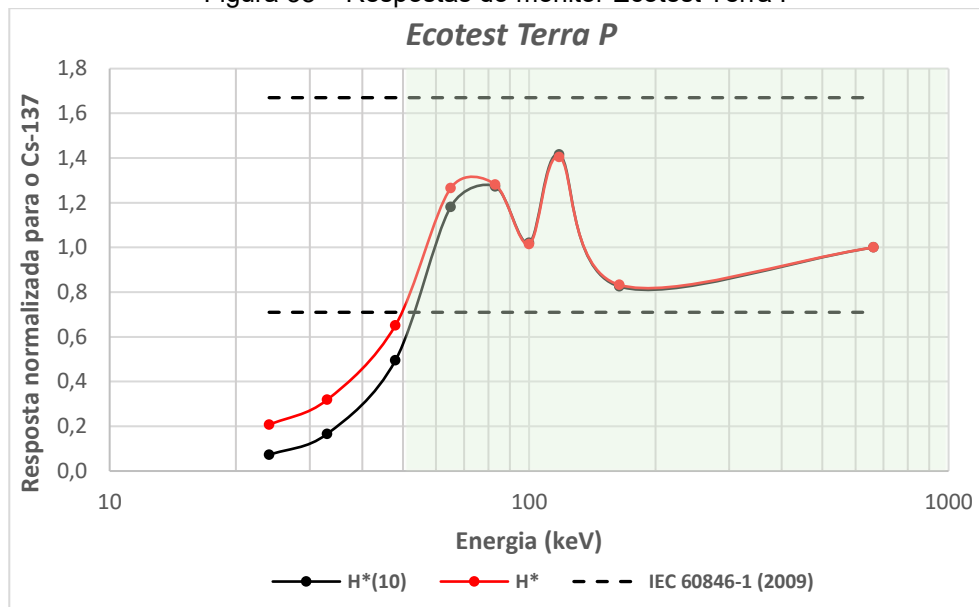
Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 38 mostra que a resposta relativa do *Ecotest Terra P*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias de fótons avaliadas na faixa recomendada pelo fabricante. Fora dessa faixa, a introdução de H^* , melhorou a resposta relativa do instrumento nas energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. Essa melhora não foi suficiente para que a resposta relativa do instrumento ficasse dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) nessas energias. Em relação as demais energias testadas, a diminuição ou o aumento na resposta relativa, de $H^*(10)$ para H^* , não foi significativa e a resposta relativa continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Ecotest Terra P* precisaria apenas ser recalibrado em H^* para operar adequadamente nessa

grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante.

Figura 38 – Respostas do monitor Ecotest Terra P

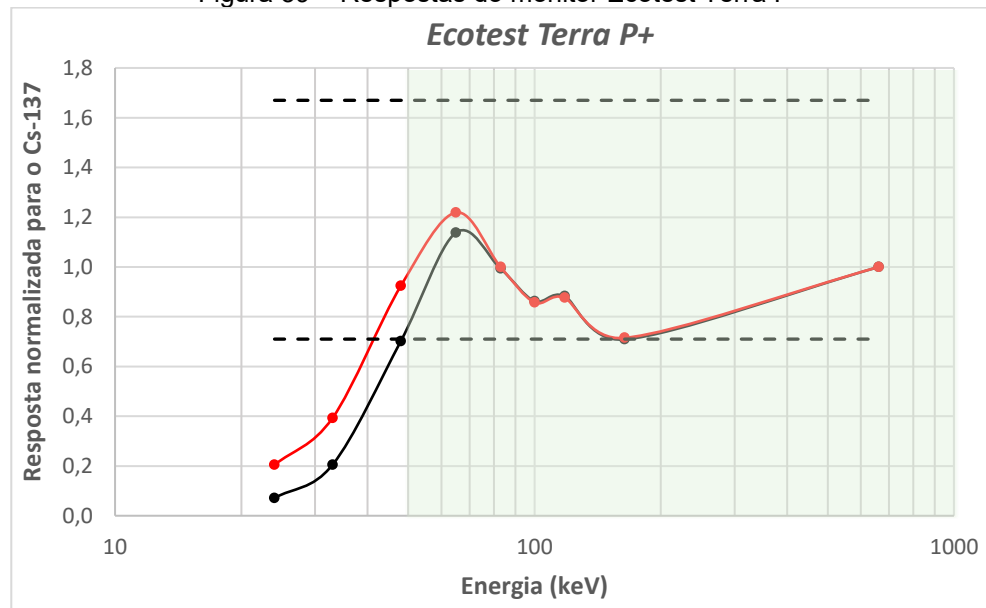


Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 39 mostra que a resposta relativa do *Ecotest Terra P+*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) para todas as energias testadas, exceto 24 keV, 33 keV e 48 keV. Contudo, essas energias estão fora da faixa recomendada pelo fabricante. A introdução de H^* impactou significativamente na resposta relativa do instrumento para a energia de 48 keV. A resposta relativa em $H^*(10)$, para essa energia, estava subestimada em 0,70. Contudo, após a introdução de H^* , essa subestimação passou a ser de 0,92 e o instrumento respondeu dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009). Em relação as demais energias, a diminuição ou o aumento na resposta, de $H^*(10)$ para H^* , não foram significativas e a dependência energética continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Ecotest Terra P+* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 48 keV.

Figura 39 – Respostas do monitor Ecotest Terra P+



Fonte: O autor (2025)

O gráfico da Figura 40 mostra que a resposta relativa do *Tracerco T202-A-4*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) para as energias avaliadas dentro da faixa recomendada pelo fabricante, exceto para as energias de 65 keV e 83 keV. As respostas do instrumento nessas energias estavam sendo subestimadas em 0,67 e 0,70, respectivamente. Após a introdução de H^* elas passaram a ser de 0,71 para ambas as energias e o instrumento passou a responder dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009). Em relação as demais energias, a diminuição ou o aumento na resposta, de $H^*(10)$ para H^* , não foram significativas e a dependência energética continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Tracerco T202-A-4* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante.

O gráfico da Figura 41 mostra que a resposta relativa do *Bertin MiniTRACEy MG-S10S*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) para as energias de feixe avaliadas na faixa recomendada pelo fabricante. Fora dessa faixa, a introdução de H^* impactou significativamente na resposta relativa do instrumento para a energia de 33 keV que era de 0,42 em $H^*(10)$, foi para 0,81 em H^* e o instrumento passou a responder dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009). Em

relação as demais energias, a diminuição ou o aumento na resposta, de $H^*(10)$ para H^* , não foram significativas e a dependência energética continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Figura 40 – Respostas do monitor Tracerco T202-A-4

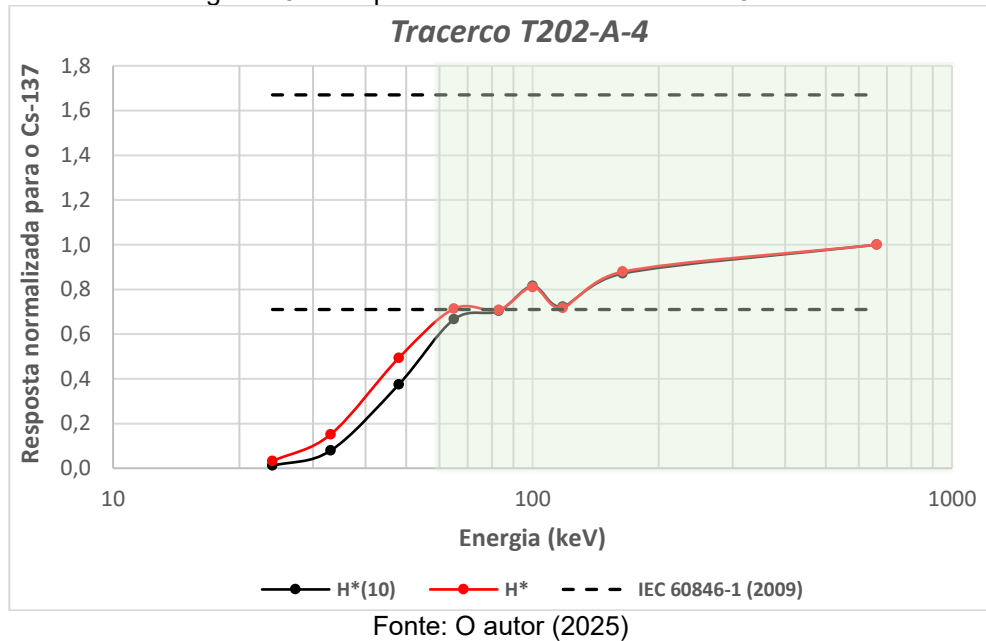
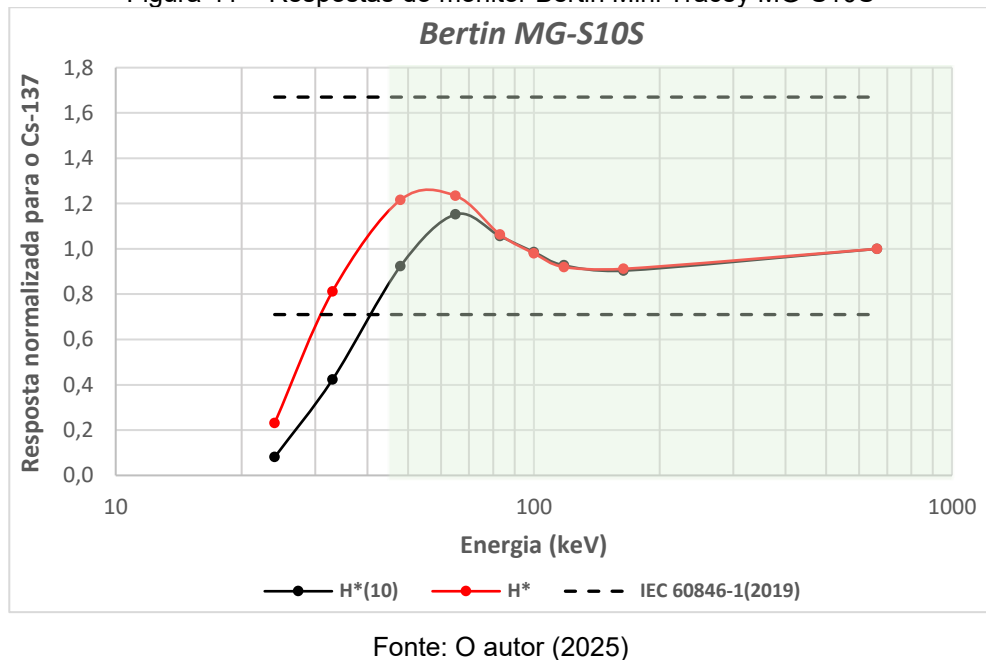


Figura 41 – Respostas do monitor Bertin Mini Tracey MG-S10S

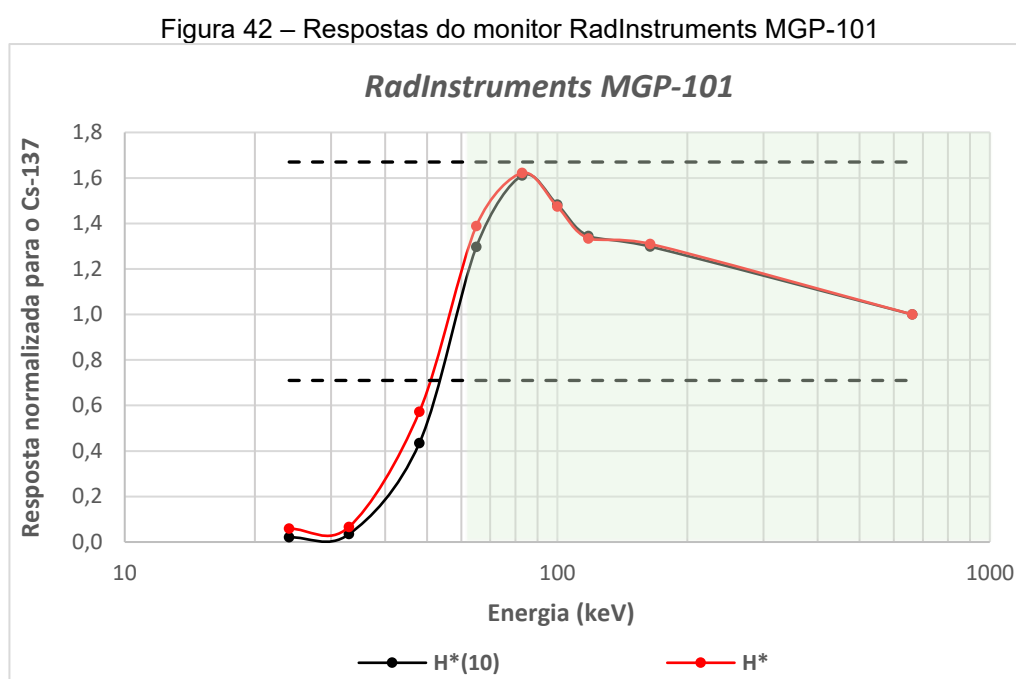


Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *Bertin MiniTRACEy MG-S10S* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da

faixa de energia recomendada pelo fabricante. Adicionalmente, esse instrumento também poderia ser utilizado para medir H^* na energia de 33 keV.

O gráfico da Figura 42 mostra que a dependência energética do *RadInstruments MGP-101*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para todas as energias de fótons avaliadas na faixa recomendada pelo fabricante. Fora dessa faixa, a introdução de H^* , melhorou a resposta do instrumento nas energias de 24 keV, 33 keV e 48 keV. Contudo, essa melhora não foi suficiente para que o mesmo respondesse dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) nessas energias. Em relação às demais energias testadas, a resposta do instrumento, em H^* , continuou praticamente a mesma que em $H^*(10)$ e dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *RadInstruments MGP-101* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante.

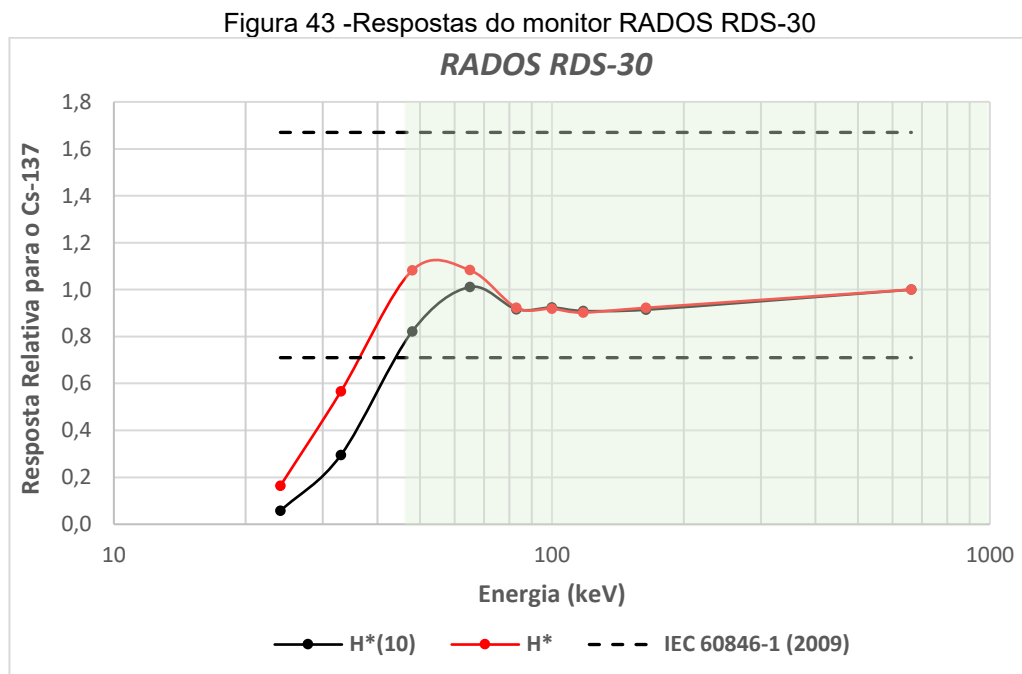


Fonte: O autor (2025).

O gráfico da Figura 43 mostra que a resposta relativa do *RADOS RDS-30*, em $H^*(10)$, ficou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009) para todas as energias de fótons avaliadas na faixa recomendada pelo fabricante. Fora dessa faixa, a

introdução de H^* impactou significativamente na resposta do instrumento para a energia de 48 keV onde a resposta era de 0,82 em $H^*(10)$ e passou a ser de 1,08 após a introdução de H^* . Em relação as demais energias, a diminuição ou o aumento na resposta, de $H^*(10)$ para H^* , não foram significativas e a resposta relativa continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *RADOS RDS-30* precisaria apenas ser recalibrado em termos de H^* para operar adequadamente nessa grandeza, nas energias de fótons avaliadas dentro da faixa de energia recomendada pelo fabricante.

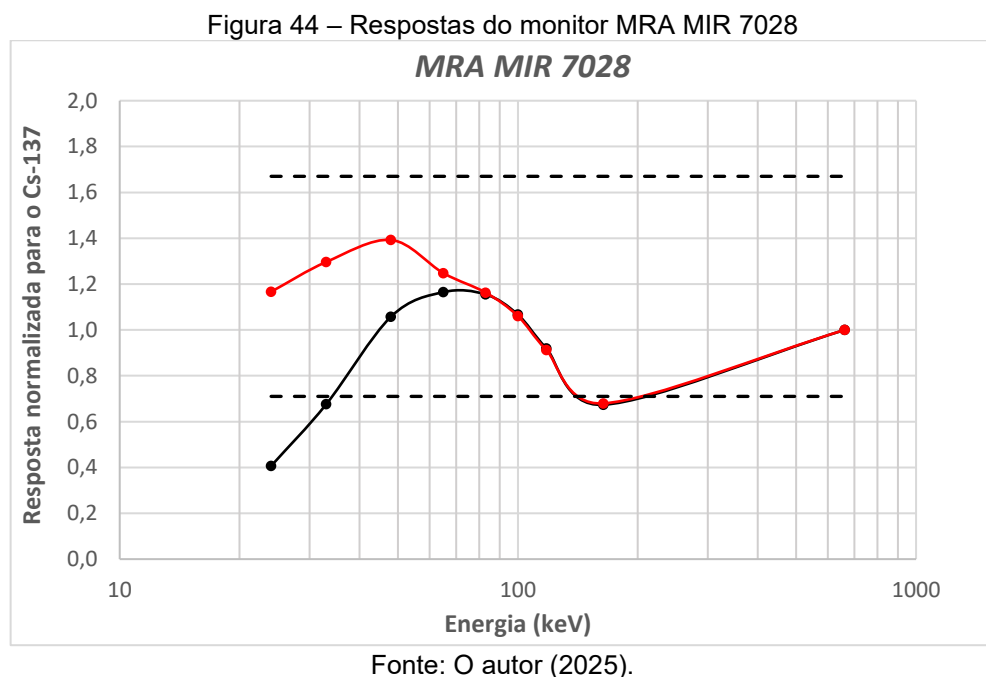


Fonte: O autor (2025).

O gráfico da Figura 44 mostra que a dependência energética do *MRA MIR 7028*, em $H^*(10)$, ficou fora dos limites recomendados pela IEC 60846-1 (2009) para energias de fótons de 24 keV, 33 keV e 164 keV. As respostas em $H^*(10)$, para as energias de 24 keV e 33 keV, apresentavam subestimações de 0,41 e 0,68, respectivamente. A introdução de H^* causou um aumento na resposta relativa de 1,17 para 24 keV e 1,30 para 33 keV e o instrumento passou a responder dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009). A resposta relativa do instrumento para a energia de 164 keV até chegou a sofrer um aumento de 0,67 para 0,68, porém não foi suficiente para que a dependência energética ficasse dentro dos limites da IEC 60846-1

(2009). Em relação as demais energias, o aumento na resposta, de $H^*(10)$ para H^* , não foi significativo e a dependência energética continuou dentro dos limites da IEC 60846-1 (2009).

Com base no resultado da análise realizada, o instrumento *MRA MIR 7028* precisa ser adaptado ou redesenhado para corrigir a dependência energética na energia de 164 keV e operar adequadamente em H^* , nas energias de fótons avaliadas.



De acordo com os resultados obtidos nesse estudo, fica claro que o impacto da introdução de H^* dependerá das características de cada instrumento, conforme mencionado no *EURADOS Report 2022-02* (EURADOS, 2022). Portanto, a dependência energética deve ser avaliada individualmente para cada modelo de monitor de área, caso essa nova grandeza seja adotada.

Atualmente no Brasil, a maioria dos monitores de área utilizados operam na grandeza *Equivalente de Dose* e *Equivalente Dose Ambiente*. Porém, ainda existem instrumentos que operam na grandeza *Taxa de Exposição*. Duante os últimos quatro anos, o LMRI recebeu cerca de 55 diferentes modelos de detectores para calibração. Desses, 22 operam na grandeza *Equivalente de Dose*, 18 na grandeza *Equivalente de Dose Ambiente* e 15 na grandeza *Taxa de Exposição*. Esse trabalho avaliou a resposta de 22 diferentes modelos de detectores, ou seja, 40% de todos os

modelos recebidos para calibração no LMRI, considerando todas as grandezas. Se for considerado apenas $H^*(10)$ (grandeza operacional do SI e adotada pela CNEN em território nacional), foram avaliados 17 dos 18 monitores recebidos para calibração, ou seja 94% de todos os modelos que operam nessa grandeza.

A resposta relativa da maioria dos monitores tende a aumentar com a introdução de H^* , principalmente em baixas energias. De uma maneira geral, é possível verificar uma relação entre a faixa de energia a qual o instrumento foi projetado para medir e a resposta apresentada por ele em H^* . Instrumentos projetados para medir fótons com energias inferiores a 50 keV tendem a apresentar uma superestimação considerável na resposta em H^* . Esse comportamento se deve a sensibilidade de baixa energia necessária para modelar a dependência energética de $H^*(10)$, conforme observou Otto (2019). Ou seja, para energias menores que 50 keV, o valor de $H^*(10)$ é muito maior que o de H^* . Por outro lado, instrumentos projetados para medir fótons com energias superiores a 50 keV tendem a apresentar uma redução considerável na sensibilidade, abaixo dessa energia, que faz com que a dependência energética deles seja praticamente insensível a fortes variações de H^* , conforme observou Otto (2019).

O aumento na resposta relativa dos monitores avaliados frente a introdução de H^* será benéfico apenas para alguns modelos uma vez que poderá “corrigir” algumas subestimações. Contudo, para outros modelos, a introdução dessa grandeza não será benéfica uma vez que eles poderão apresentar superestimações excessivas. Esse resultado está de acordo com o observado no *EURADOS Report 2022-02* (EURADOS, 2022).

Nesse estudo, 15 instrumentos demonstraram melhora na dependência energética frente a introdução da nova grandeza operacional H^* . Todos esses instrumentos são capazes de medir essa grandeza, até mesmo para energias menores que o limite inferior especificado pelo fabricante, bastaria apenas recalibrá-los em H^* . A Tabela 4 lista os 15 instrumentos que só precisariam ser recalibrados para operar em H^* considerando os limites da IEC 60846-1 (2009). Importante destacar que três desses instrumentos (*Tracerco T202-A-4*, *Graetz GPD 100*, *Ludlum mod 3*) apresentaram subestimações além dos limites da IEC 60846-1 (2009) em $H^*(10)$, mas elas foram “corrigidas” após a introdução de H^* . Esse resultado está de acordo com o observado por Čemusová e colaboradores (2022).

Tabela 4 - Monitores de área que só precisariam ser recalibrados em H^*

Fabricante	Modelo	Energia (keV)
Fluke Biomedical	451P-DE-SI-RYR	Acima de 25
Graetz	GPD 100	48 – 2000
Victoreen	190 I	Acima de 25
Ludlum	MOD 3	60 – 1300
Thermo Scientific™	FH 40 G-10	30 – 4400
Thermo Scientific™	RadEye G-10Ex	50 – 3000
Automess	6150 AD 6/H	60 – 1300
Ecotest	Terra-P+	50 – 3000
RadInstruments	MGP-101	50 – 1300
Mirion	RDS-32 WR	55 – 1800
Ecotest	Terra-P	50 – 3000
Tracerco	T202-A-4	59 – 1332
Bertin	MG-S10S	45 – 3000
Automess	6150 AD-18/H	65 – 1300
RADOS	RDS-30	48 – 1300

Fonte: O autor (2025).

Para alguns instrumentos, a introdução de H^* permitiria até ampliar a faixa de energia a qual o mesmo é destinado a medir. A Tabela 5 mostra os 7 instrumentos que poderiam ampliar a faixa de energia a qual operam após a introdução de H^* . O maior beneficiado com a introdução de H^* seria o Bertin MG-S10S, pois o limite inferior da faixa de energia a qual ele opera poderia ser ampliado de 45 keV para 33 keV.

Todos os 7 monitores de área restantes, avaliados nesse estudo, não seriam capazes de medir H^* sem passar por modificação física (adaptação). Essa modificação pode ser feita através da utilização de filtros no tubo *Geiger*. Entretanto, a escolha do material e a configuração ideal para o filtro deve ser avaliada caso a caso. Quatro instrumentos apresentaram uma dependência energética ruim tanto para $H^*(10)$ quanto para H^* e três instrumentos (*Thermo FH 40 G-10*, *Thermo FH 40 G-L 10Ω*, *Thermo RadEye B20-ER*) apresentaram uma dependência energética boa em $H^*(10)$ e ruim em H^* . A Tabela 6 lista os 7 instrumentos que precisariam ser adaptados para operar adequadamente em H^* , considerando os limites da IEC 60846-1 (2009).

Tabela 5 - Monitores que poderiam ampliar a faixa de energia de operação

Fabricante	Modelo	Energia (keV)
Thermo Scientific™	RadEye G-10	50 – 3000
Thermo Scientific™	RadEye G-10Ex	50 – 3000
Automess	6150 AD 6/H	60 – 1300
Ecotest	Terra-P+	50 – 3000
Mirion	RDS-32 WR	55 – 1800
Bertin	MG-S10S	45 – 3000
Automess	6150 AD-18/H	65 – 1300

Fonte: O autor (2025).

Tabela 6 - Monitores de área que precisariam ser adaptados para medir H*

Fabricante	Modelo	Energia (keV)
Fluke Biomedical	Inovision 451P	Acima de 25
Arrow-Tech	Dosimeter 3009 A	Não disponível
Graetz	X 50 DE	40 – 1300
Thermo Scientific™	FH 40 G-10	30 – 4400
Thermo Scientific™	FH 40G-L10Ω	30 – 4400
Thermo Scientific™	RadEye B20-ER	17 – 3000
MRA	MIR 7028	Não disponível

Fonte: O autor (2025).

5 CONCLUSÃO

As grandezas operacionais propostas pela ICRU 95 para monitoração de área, afetam a dependência energética dos detectores de radiação utilizados para medi-las, conforme foi observado nesse trabalho. Assim, é importante avaliar esse impacto para verificar a resposta de cada modelo de monitor de área frente a introdução dessa nova grandeza.

Esse trabalho avaliou 22 modelos de monitores de área frequentemente calibrados no LMRI/DEN/UFPE, o que corresponde a 40% de todos os modelos calibrados entre os anos de 2022 e 2025, e concluiu que:

- Alguns instrumentos apresentam boa dependência energética em $H^*(10)$.
- A resposta relativa da maioria dos monitores tende a aumentar com a introdução de H^* , principalmente em baixas energias.
- O aumento na resposta relativa dos monitores de área, frente a introdução de H^* , poderá melhorar ou piorar a dependência energética que eles apresentam em $H^*(10)$.
- Instrumentos projetados para medir fótons com energias inferiores a 50 keV tendem a apresentar uma superestimação considerável na resposta em H^* .
- Instrumentos projetados para medir fótons com energias superiores a 50 keV tendem a apresentar uma redução considerável na sensibilidade, abaixo dessa energia, que faz com que a dependência energética deles seja praticamente insensível a fortes variações de H^* .
- De todos os monitores avaliados, 15 só precisariam ser recalibrados em H^* e 7 deveriam passar por modificação física para melhorar a dependência energética nessa nova grandeza.
- O impacto da introdução de H^* para os monitores de área é pequena e está restrito aos instrumentos projetados para medir fótons com energias inferiores a 50 keV.

REFERÊNCIAS

BEHRENS, R; OTTO T. Conversion Coefficients from Total air Kerma to the Newly Proposed ICRU/ICRP Operational Quantities for Radiation Protection for Photon Reference Radiation Qualities. **Journal of Radiological Protection**. v. 42 p. 1-50, 2022.

BEHRENS, R; Dietze, G. Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens. **Physics Medicine Biology**. v. 56, p. 415–437, 2011.

ČEMUSUVÁ Z.; EKENDAHL, D.; JUDAS, L.; KAPUCIÁNOVÁ, M.; KUČA, P.; VYKYDAL, Z. Response of Current Area Dosimeters to New Operational Quantities. **Radiation Protection Dosimetry**. v. 198, p. 1313-1321, 2022.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **CNEN NN-3.01: Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação**. Rio de Janeiro: CNEN, 2024.

EURADOS. European Radiation Dosimetry Group e. V. E. **EURADOS Report 2022-02: Evaluation of the Impact of the New ICRU Operational Quantities and Recommendations for their Practical Application**, Neuherberg: EURADOS, 2022.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Safety Reports Series N° 16: Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments**, Vienna: IAEA, 1999.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **IAEA Technical Reports Series No. 398. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy**. Vienna: IAEA, 2000.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Safety Standards Series N° GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards**. Vienna: IAEA, 2014.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007, 35 p.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Realistic reference phantoms: an ICRP/ICRU joint effort. A report of adult reference computational phantoms**. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39, 2009.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Radiation Quantities and Units**, ICRU Report 33. Bethesda, 1980.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources**, ICRU Report 39. Bethesda, 1985.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation**. ICRU Report 85a. Journal of the ICRU, v. 11, n. 1, 2011.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Operational Quantities for External Radiation Exposure** J. ICRU 20(1) ICRU Report 95. Sage Publishing, Thousand Oaks, CA, 2020.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry**, ICRU Report 51. Bethesda, 1993.

IEC. International Electrotechnical Commission. **Radiation Protection Instrumentation-Ambient And/or Directional Dose Equivalent (Rate) Meters and/or Monitors for Beta, X and Gamma Radiation - Part 1: Portable Workplace and Environmental Meters and Monitors**. IEC 60846-1. 2009.

ISO/IEC. International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission. **General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories**, IEC 17025: 2017, Geneva. 2017.

ISO. International Organization for Standardization. **X and Gamma Reference radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy. Part 1: Radiation characteristics and production methods**. ISO 4037–1, Geneva. 2019.

ISO. International Organization for Standardization. **X and Gamma Reference radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy. Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV**. ISO 4037–2, Geneva. 2019.

ISO. International Organization for Standardization. **X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy. Part 3: Calibration of Area and Personal Dosemeters and the Measurement of their Response as a Function of Energy and Angle of Incidence**. ISO 4037–3 (Geneva). 2019.

MARTIN, J. E. **Physics for Radiation Protection: Handbook**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006.

Otto, T. "Response of Photon Dosimeters and Survey Instruments to New Operational Quantities, Proposed by ICRU RC 26," **Journal of Instrumentation**. v. 14, p. 1-11, 2019.