UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIENCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS
E NUCLEARES (PROTEN)

MACILENE NAZÁRIO DE SOUZA

ESTUDO DA RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA MEDIDAS DE EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTAL H*(10)

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL
NOVEMBRO - 2005

ESTUDO DA RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA MEDIDAS DE EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTAL H*(10)

MACILENE NAZÁRIO DE SOUZA

Estudo da Resposta de Monitores de Radiação para Medidas de Equivalente de Dose Ambiental H*(10)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Orientadora:
Prof. Dra. Helen Jamil Khoury

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL
NOVEMBRO - 2005

S618e **Souza, Macilene Nazário de.**

Estudo da resposta de monitores de radiação para medidas de equivalente de dose ambiental H*(10). – Recife: O Autor, 2005.

92 folhas. : il. ; fig., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Energia Nuclear, 2005.

Inclui bibliografia.

1. Energia nuclear. 2. Dosimetria e instrumentação nuclear. 3. Monitores de radiação. I. Título.

UFPE

612.01448 CDD (22.ed.) **BCTG/2007-006**

ESTUDO DA RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA MEDIDAS DE EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTAL H* (10)

Macilene Nazário de Souza

APROVADA EM: 07.11.2005

ORIENTADORA : Profa. Dra. Helen Jamil Khoury

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin – CRCN/CNEN-PE

Profa. Dra. Linda Viola Ehlin Caldas – IPEN/CNEN-SP

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Dedico este trabalho

Aos meus pais, D. Maria e Sr. Souza, por toda dedicação, amor, disciplina, dignidade e sabedoria, bons exemplos que são os maiores tesouros que trago comigo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser a minha fortaleza e a luz maior que guia meus passos e ações.

Aos meus pais, irmãs, sobrinhos, sogros, cunhadas e cunhados pelos conselhos e incentivos no decorrer do trabalho.

À meu marido, Mardson, por seu amor e apoio constante.

À Professora Helen Jamil Khoury, por sua orientação na realização do trabalho.

Aos amigos Cyntia, Dayse, Eutrópio, Elias, Égita, Edvânia, Iran, Jucilene, Péricles, Poliana, Sérgio e Vinícius, pela descontração, pela força de seus incentivos, pelas discussões e sugestões para o andamento do trabalho.

Aos funcionários do DEN, Magali, Antônio, Edvaldo, Eliete, Juarez, Lia e Zeza, pela amizade e profissionalismo com o qual desempenham suas funções.

Ao DEN/UFPE pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao LMRI/DEN por viabilizar o desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez”.

Thomas Edson

RESUMO

O equivalente de dose ambiental, H*(10), é definido como o equivalente de dose produzido por um campo de radiação expandido e alinhado, a uma profundidade de 10 mm em uma esfera ICRU. Essa grandeza operacional é recomendada pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas da Radiação (ICRU) para a monitoração de área.

Com base na sua definição, as medidas em termos de H*(10) devem ser efetuadas com um instrumento com resposta isotrópica e com um volume sensível pequeno a fim de não perturbar o campo de radiação.

Na prática, no entanto, os monitores de área geralmente encontrados são projetados para medidas de exposição ou de Kerma no ar. Por essa razão alguns equipamentos que apresentam excelente resposta em termos de exposição são inadequados para medidas em termos de H*(10).

O objetivo desse trabalho é de avaliar a resposta em termos de H*(10) de diversas marcas de monitores de radiação usados no país, caracterizando a dependência energética e angular da sua resposta para medições na nova grandeza, para feixes de raios-X qualidade ISO (feixe estreito) e feixes gama do ^{137}Cs e ^{60}Co.

Os resultados mostraram que nenhum dentre os monitores de área testados atende simultaneamente a todos os requisitos estabelecidos pela Norma IEC 60846 com relação à dependência energética e angular quando utilizados em termos de H*(10).

Através dos resultados, também pôde-se verificar que há a necessidade de uma caracterização dos monitores de área disponíveis no país, antes da implementação das novas grandezas operacionais do ICRU.

Palavras-chave: Energia nuclear; Dosimetria e instrumentação nuclear; Monitores de radiação; Equivalente de dose ambiental, H*(10); Grandeza operacional ICRU.

ABSTRACT

The Ambient dose equivalent, H*(10), is defined as the dose equivalent which will be produced at a depth of 10 mm in ICRU sphere by an aligned and expanded field.

This operational quantity is recommended by the International Commission of Radiation Units and Measurements (ICRU) for area monitoring. Based on its definition, the measurement in a radiation field must be performed with an instrument having an isotropic response and a small sensitive volume, so that the radiation field is not disturbed.

In pratice, however, the survey meters usually employed are designed to measure exposure or air kerma. For this reason, an ideal exposure meter can provide a poor measure of the ambient dose equivalent, H*(10).

The aim of this work is to evaluate the response in terms of H*(10) of seven survey meters usually employed in Brazil. Their energy dependence and angular response were studied using the ISO 4037-1 reference X-ray radiations (narrow beams) and gamma radiations from ^{137}Cs e ^{60}Co sources.

The results showed that all the instruments evaluated presented an inadequate response in terms of H*(10) as when the energy dependence and the angular response are considered together.

The results obtained in this work showed that it is necessary to make the caracterization of the survey area monitors used in Brazil before the implementation of the new ICRU dose equivalent operational quantities.

Keywords: Nuclear Energy; Dosimetry and nuclear intrumentation; Radiation monitors; Ambient dose equivalent, H*(10); ICRU operational quantity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema das grandezas de proteção e operacionais 21

Figura 2: Campo de radiação real com a fluência em um ponto P. 24

Figura 3: Campo de radiação expandido do ponto P, com a esfera ICRU representada pelo círculo para ilustrar o tamanho do campo de radiação. 24

Figura 4: Campo de radiação alinhado, com a esfera ICRU representada pelo círculo para ilustrar o tamanho do campo de radiação.. 25

Figura 5: Geometria de irradiação da esfera ICRU em um ponto P'. 26

Figura 6: Relação entre H_E e H*(10) versus energia do fóton sobre condições de irradiação variadas. 27

Figura 7: Relação do H*(10) com o Kerma no ar e exposição 28

Figura 8: Resposta energética para H*(10) do MIR 7026 (GM sem filtro de compensação) 33

Figura 9: Resposta do monitor MIR 7026 em termos de H*(10) em função da energia da radiação para detector GM com filtro 34

Figura 10: Resposta do monitor GM em função da energia, para exposição, X, e equivalente de dose ambiental, H*(10).. 34

Figura 11: Resposta angular do MIR 7026 normalizada para o ^{137}Cs a 0° nos planos horizontal e vertical 35

Figura 12: arranjo experimental para irradiação de equipamentos em raios-X. 38

Figura 13: Arranjo experimental utilizando a câmara NE Technology modelo 2575 C 39

Figura 14: Arranjo experimental para medidas da CSR 40

Figura 15: Irradiador STS OB85/3 com compressor. 43

Figura 16: Arranjo experimental utilizando a câmara NE Technology com capa de equilíbrio eletrônico B para determinação dos valores de Kerma no ar para as fontes de ^{137}Cs e ^{60}Co. 45

Figura 17: Arranjo experimental para irradiação dos monitores de área em feixes de ^{137}Cs e ^{60}Co. 49

Figura 18: Ângulos de incidência considerados para irradiação dos monitores em estudo. 52

Figura 19: Arranjo experimental para variação do ângulo de incidência dos feixes de radiação nos monitores estudados. 52

Figura 20: Variação da resposta dos monitores, com a energia, em termos de taxas de Kerma no ar e H*(10) normalizada para o Cs-137 em incidência normal, 0°, para os monitores Dosimeter 3009A, Inovision 451P., Ludlum 3, Graetz X5DEx 70

Figura 21: Variação da resposta dos monitores, com a energia, em termos de taxas de Kerma no ar e H*(10) normalizada para o Cs-137 em incidência normal, 0°, para os monitores Victoreen 190 I , Graetz GPD 100 e MIR 7026 71

Figura 22: Variação da resposta angular dos monitores Dosimeter 3009 A, Ludlum 3, Inovision 451P e Graetz X5Dex, em H*(10), para feixe de R-X 83 keV e feixes gama ^{137}Cs e ^{60}Co..... 78

Figura 23: Variação da resposta angular dos monitores Victoreen 190I para ^{137}Cs e ^{60}Co , Graetz GPD 100 e MIR 7026, em H*(10), para feixe de R-X 83 keV e feixes gama ^{137}Cs e ^{60}Co e. 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de peso da radiação para diferentes tipos e energias de radiação ionizante. 19

Tabela 2: Valores dos fatores de peso w_T para tecidos ou órgãos - ICRP 60..... 20

Tabela 3: Novas grandezas operacionais do ICRU 23

Tabela 4: Variações percentuais para valores de fatores de conversão para H*(10) 28

Tabela 5: Principais Características dos detectores de radiação empregados para monitoração de área..... 31

Tabela 6: Variação em equivalente de dose ambiental da resposta de instrumentos comerciais com a variação da energia do fóton, utilizando-se câmaras de ionização, cintiladores e Geiger Muller. (resposta normalizada para o ^{137}Cs)..... 32

Tabela 7: Equipamentos monitores de área calibrados em H*(10). 36

Tabela 8: Características operacionais dos monitores analisados neste trabalho, segundo dados do fabricante..... 37

Tabela 9: Características do feixe de raios-X qualidade espectro estreito segundo IS0 4037-1 39

Tabela 10: Valores de CSR obtidas nos feixes de raios-X qualidade ISO implantadas no DEN/UFPE 42

Tabela 11: Valores das taxas de Kerma no ar obtidas a 300 cm do foco do aparelho de raios-X com correntes de tubo de 2mA, 5mA e 10 mA. 43

Tabela 12: Espessuras dos discos de chumbo utilizados para atenuação do feixe de radiação..... 44

Tabela 13: Valores da taxa de Kerma no ar a 100 cm de distância da fonte de ^{137}Cs..... 46

Tabela 14: Valores da taxa de a 100 cm de distância da fonte de ^{60}Co..... 46

Tabela 15: Coeficientes de conversão de Kerma no ar para equivalente de dose ambiental, H*(10)..... 47

Tabela 16: Planilha para cálculo de incerteza da medição para o monitor de área Dosimeter 3009 A em feixes de ^{60}Co. 56

Tabela 17: Planilha para cálculo de incerteza da medição para o monitor de área Dosimeter 3009 A em feixes de raios-X. 57

Tabela 18: Valores de $\dot{H}^*(10)$ utilizados com feixes de ^{137}Cs a 1 m utilizando o coeficiente de conversão de 1,2 Sv/Gy..... 58

Tabela 19: Valores de $\dot{H}^*(10)$ utilizados com feixes de ^{60}Co a 1 m utilizando o fator de conversão de 1,16 Sv/Gy..... 59

Tabela 20: Valores de $\dot{H}^*(10)$ utilizados para as qualidades do feixe de raios-X a 300 cm do tubo. 59

Tabela 21: Resposta do monitor de radiação Dosimeter 3009 A em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co. 60

Tabela 22: Resposta do monitor de radiação Graetz X5DEx em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°..... 61

Tabela 23: Resposta do monitor de radiação Inovision 451P em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°..... 62

Tabela 24: Resposta do monitor de radiação Ludlum modelo 3 sonda 44-38 em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°..... 63

Tabela 25: Resposta do monitor de radiação MIR 7026 em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°. 64

Tabela 26: Resposta do monitor de radiação Graetz GPD 100 em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°..... 65

Tabela 27: Resposta do monitor de radiação Victoreen 190 I em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°..... 66

Tabela 28: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área Dosimeter modelo 3009 A 67

Tabela 29: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área Graetz X5DEx 67

Tabela 30: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área Inovision 451 P..... 68

Tabela 31: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área Ludlum 3 sonda 44-38..... 68

Tabela 32: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área MIR 7026 68

Tabela 33: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área Graetz GPD 100 69

Tabela 34: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área Victoreen 190 I..... 69

Tabela 35: limites estipulados para dependência energética pela IEC 60846..... 72

Tabela 36: Percentual de variação da resposta dos monitores na faixa de 48 keV a 83 keV em temos de H*(10) e Kerma no ar..... 72

Tabela 37: Percentuais de variação da resposta dos monitores, em função da energia, em termos de H*(10)..... 73

Tabela 38: Resposta do monitor de radiação Dosimeter 3009 A em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90°a +90°..... 74

Tabela 39: Resposta do monitor de radiação Graetz X5DEx em função de H*(10), para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°..... 75

Tabela 40: Resposta do monitor de radiação Inovision 451 P em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos -90°a +90°..... 75

Tabela 41: Resposta do monitor de radiação Ludlum modelo 3 sonda 44-38 em função de H*(10) para feixes 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°. 76

Tabela 42: Resposta do monitor de radiação MIR 7026 em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°. 76

Tabela 43: Resposta do monitor de radiação Graetz GPD 100 em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°. 77

Tabela 44: Resposta do monitor de radiação Victoreen 190 I em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90°a +90°. 77

Tabela 45: Limites de aceitação para a dependência angular segundo a IEC 60846 (2001) 80

Tabela 46: Variação percentual da dependência angular dos monitores estudados para feixes de incidência qualidade ISO N-100 e feixes de ^{137}Cs e ^{60}Co. 81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16
2. REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1 GRANDEZAS EM RADIOPROTEÇÃO 18
2.2 NOVAS GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA 22
2.3 RESPOSTA DOS MONITORES DE ÁREA EM TERMOS DE H*(10) 29
3. METODOLOGIA 36
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO FEIXE DE RADIAÇÃO 38
3.1.1 FEIXES DE RAIOS-X 38
3.1.2 FEIXES DE ^{137}Cs e ^{60}Co 43
3.2 MEDIDAS EM H*(10) COM OS MONITORES DE ÁREA 47
A) MEDIDA DA RESPOSTA DO MONITOR EM FEIXES DE ^{137}Cs e ^{60}Co 48
B) MEDIDAS COM FEIXES DE RAIOS-X 49
C) AVALIAÇÃO DA INDICAÇÃO DO MONITOR EM FUNÇÃO DO H*(10) 50
D) ESTUDO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA 50
E) ESTUDO DA DEPENDÊNCIA ANGULAR 51
3.3 CALCULO DA INCERTEZA 53
A) Reprodutibilidade da resposta do monitor 53
B) Resolução do monitor em estudo. 54
C) Posicionamento do monitor 54
D) Padrão de Calibração 55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 58
4.1 MEDIDAS EM H*(10) 58
4.2 ESTUDO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA 60
4.3 DEPENDÊNCIA ANGULAR 74
5 CONCLUSÕES 82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84
APÊNDICE A – Curvas de calibração do monitor Dosimeter 3009A em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 86
APÊNDICE B – Curvas de calibração do monitor Graetz X5DEx em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 87

APÊNDICE C – Curvas de calibração do monitor Inovision 451P em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 88
APÊNDICE D – Curvas de calibração do monitor Ludlum modelo 3 com sonda 44-38 em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 88
APÊNDICE E – Curvas de calibração do monitor IEN CNEN Brasil modelo MIR 7026 em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 90
APÊNDICE F – Curvas de calibração do monitor Graetz GPD 100 em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 91
APÊNDICE G – Curvas de calibração do monitor Victoreen 190I em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias 92

1. INTRODUÇÃO

O uso das radiações ionizantes nos diversos tipos de aplicações tem crescido nos últimos anos em função dos avanços tecnológicos e do desenvolvimento das técnicas nucleares. Com isso também tem aumentado o número de trabalhadores e indivíduos do público expostos à radiação ionizante devido às fontes não naturais.

Preocupada com os riscos decorrentes do uso das radiações, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica, ICRP[1] , vem publicando ao longo dos anos documentos com as diretrizes de proteção radiológica. Em 1977 a ICRP lançou o documento número 26, no qual estabelece princípios básicos da proteção radiológica como os princípios da *justificativa, da otimização e do limite de dose*.

O princípio da justificativa requer que seja efetuada a análise do risco e do benefício do uso da radiação, de modo que nenhuma atividade que envolva radiações ionizantes deve ser adotada, a não ser que o seu uso resulte em benefícios para a sociedade que sejam maiores do que os riscos envolvidos. Por outro lado, o princípio da otimização requer que a dose recebida devido a um dado procedimento que envolve radiação seja a menor razoavelmente possível, respeitando os fatores econômicos e sociais (princípio do ALARA – As Low As Reasonably Achievable).

O sistema de limitação de dose é estabelecido para trabalhadores e para indivíduos do público de modo que os efeitos determinísticos[2] da radiação sejam evitados e a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos[3] seja a menor possível.

Em 1991, a ICRP publicou no seu documento n° 60, novas recomendações para o sistema de proteção radiológica introduzindo novas grandezas limitantes, substituindo o equivalente de dose efetiva por dose efetiva. No Brasil, a Norma NN 3.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear foi revisada e oficializada em janeiro de 2005 introduzindo as alterações da ICRP 60.

---

[1] International Commission on Radiological Protection.

[2] Efeitos Determinísticos são aqueles para os quais existe um limiar de dose absorvida necessário para a sua ocorrência e cuja gravidade aumenta com o aumento da dose.

[3] Efeitos Estocásticos são aqueles para os quais não há um limiar de dose para sua ocorrência e cuja probabilidade de ocorrência é uma função da dose. A gravidade desses efeitos é independente da dose.

É importante ressaltar que as grandezas utilizadas para o sistema de limitação de dose não são mensuráveis e por isto a ICRU[4] desenvolveu as grandezas operacionais para medidas da exposição à radiação por fontes externas. Essas grandezas foram definidas na publicação ICRU 39 (1985), que foi revisada em 1992 com a publicação ICRU 47 (1992).

Para monitoração de área duas grandezas são recomendadas: Equivalente de dose ambiental, H*(d), para radiações fortemente penetrantes e Equivalente de dose direcional H'(d, **Ω**), para radiações fracamente penetrantes.

Segundo a ICRU 51 (1993), as radiações fracamente penetrantes correspondem às partículas alfa e beta com energias abaixo de 2 MeV e fótons com energias de até 12 keV. Os nêutrons são sempre classificados como radiação fortemente penetrante.

Para monitoração individual, duas novas grandezas também foram propostas: Equivalente de dose pessoal, penetrante, $H_P(d,\Omega)$, para radiação fortemente penetrante e Equivalente de dose pessoal, superficial, $H_S(d, \Omega)$, para radiação fracamente penetrante. Os símbolos d e **Ω**, em cada uma destas grandezas se referem respectivamente à profundidade, em milímetros, e à direção na qual a estimativa da dose foi feita.

Utiliza-se também o H'(3, **Ω**) para monitoração de feixes de radiação fracamente penetrantes nos casos em que a limitação da dose nas lentes dos olhos torna-se importante.

De modo geral, os equipamentos utilizados para monitoração de área não são projetados para medidas em equivalente de dose ambiental. No Brasil, em particular, ainda não está regulamentado o uso do equivalente de dose ambiental, H*(10), de modo que para implementação desta grandeza no país, torna-se necessário uma avaliação da resposta dos monitores de radiação atualmente em uso, em termos desta grandeza operacional.

Neste sentido, é objetivo deste trabalho avaliar a resposta em termos de H*(10) de diversos tipos de monitores de área utilizados no país, visando dar subsídios aos órgãos de regulamentação e aos usuários para a implementação da grandeza operacional H*(10).

---

[4] International Commission on Radiation Units and Measurements

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 GRANDEZAS EM RADIOPROTEÇÃO

A grandeza fundamental em proteção radiológica é a dose absorvida (ICRU, 1993), que é uma medida da energia média depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa ***"dm",*** como mostra a equação 1. A unidade de dose absorvida é o joule por quilograma, J/kg, que recebe o nome especial de gray (Gy)

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \tag{1}$$

Entretanto, a correlação entre os efeitos provocados pela deposição de energia em tecidos e órgãos e a dose absorvida é uma função complexa que envolve, além da própria dose, outros fatores, como o tipo do tecido ou órgão considerado e a qualidade da radiação envolvida no processo. De fato, uma dada dose absorvida pode resultar em diferentes níveis de danos biológicos dependendo do tipo da radiação. A grandeza *dose equivalente*, simbolizada por H_T (ICRP, 1991), leva em consideração o impacto biológico da radiação e é dada pela expressão:

$$H_T = \sum_R w_R . D_{T,R} \tag{2}$$

onde

w_R é o fator de peso da radiação incidente no órgão ou tecido

$D_{T,R}$ é a dose absorvida média, em um órgão ou tecido.

O fator w_R leva em consideração os efeitos biológicos decorrentes da radiação ionizante. No documento 116 da NCRP (1993) é definido como o fator multiplicador, sem dimensão, utilizado com propósitos de proteção radiológica, levando em consideração as diferenças nos efeitos biológicos ou de eficiências entre os vários tipos de radiações ionizantes.

A Tabela 1 mostra os valores de w_R recomendados pela ICRP no seu documento número 60 (1991).

Tabela 1: Fatores de peso da radiação para diferentes tipos e energias de radiação ionizante.

Tipo e Energia da Radiação (R)	**Fator de Peso da Radiação (w_R)**
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e múons, todas as energias	1
Nêutrons, energias <10 keV	5
Nêutrons de 10 keV a 100 keV	10
Nêutrons >100 keV a 2 MeV	20
Nêutrons >2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Prótons, exceto os de recuo, com energia > 2MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão e núcleos pesados	20

Para fornecer a estimativa do risco da exposição total às radiações ionizantes, foi introduzida a grandeza Dose efetiva (effective dose), simbolizada por *E*.

A dose efetiva leva em consideração tanto o tipo e a energia da radiação quanto a radiosensibilidade do órgão ou parte do corpo irradiado. A dose efetiva, *E*, é dada pela expressão:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \tag{3}$$

Onde H_T é a dose equivalente e w_T é o fator de peso para o tecido ou órgão correspondente.

Este fator, dado na Tabela 2 corresponde à porcentagem do risco do efeito estocástico quando o corpo inteiro é irradiado de forma uniforme.

Tabela 2: Valores dos fatores de peso w_T para tecidos ou órgãos - ICRP 60

Tecido ou órgão	Fatores de peso w_T ICRP 60
Bexiga	0,05
Medula vermelha	0,12
Ossos	0,01
Seios	0,05
Cólon	0,12
Gônadas	0,20
Fígado	0,05
Pulmão	0,12
Esôfago	0,05
Ovários	-
Pele	0,01
Estômago	0,12
Tireóide	0,05
Restante*	0,05
Total	1,00

*cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, pâncreas, vesícula, timo, glândulas Adrenais, e massa muscular total.

Entretanto, essa grandeza não é mensurável e por isso a ICRU, através do documento nº 39 de 1985, introduziu quatro novas grandezas para uso em radioproteção com fontes de radiação externas. O ***Equivalente de dose ambiental, H*(d), Equivalente de dose direcional, H´(d), Equivalente de dose individual, penetrante, $H_p(d)$*** e ***Equivalente de dose, superficial, $H_s(d$***), cuja unidade de medida é o ***J/kg*** recebendo o nome especial de ***sievert (Sv)*.**

Na Figura 1 está esquematizada a relação entre estas diferentes grandezas dosimétricas.

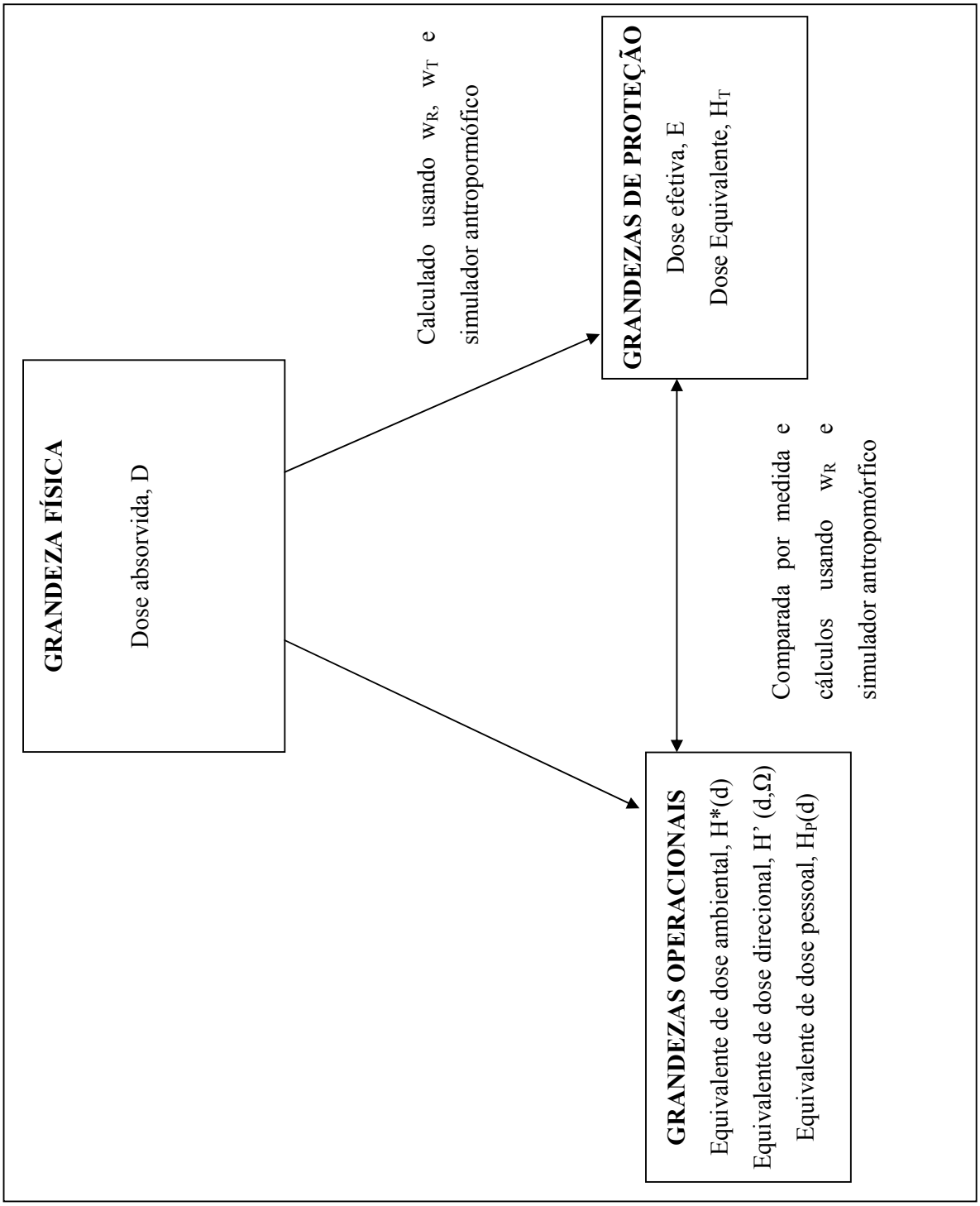


Figura 1: Esquema das grandezas de proteção e operacionais

2.2 NOVAS GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A monitoração das radiações externas visa obter informações sobre as condições de radiação associadas com as operações que estão sendo executadas. Ela pode ser de dois tipos:

a) Monitoração individual – corresponde à monitoração do indivíduo ao longo de suas atividades no ambiente de trabalho.

b) Monitoração de área – é a monitoração do ambiente de trabalho e tem por objetivo garantir que as condições operacionais sejam satisfatórias (ICRU, 1988). É uma medida preventiva uma vez que possibilita a tomada de ações corretivas em casos de risco existente no ambiente de trabalho.

Na monitoração de área nas novas grandezas operacionais leva-se em conta o efeito de dois tipos de radiação:

a) radiação penetrante

b) radiação pouco penetrante

Para radiação penetrante, procura-se estimar a dose efetiva e a grandeza utilizada é o ***Equivalente de dose ambiental*** (ambient dose equivalent) - H*(10), definido por:

Equivalente de dose ambiental, H*(10), em um ponto de interesse do campo de radiação***, é a dose equivalente que seria produzida pelo correspondente campo de radiação alinhado e expandido em uma esfera ICRU, a 10 mm de profundidade, em um raio de direção oposta ao campo alinhado*** (ICRU, 1985).

Portanto, é importante observar que na definição do equivalente de dose ambiental deve-se incluir a referência da profundidade (10), que é expressa em milímetro, (mm). O H*(10) é uma estimativa conservativa da dose efetiva.

Para a monitoração de área devido às radiações pouco penetrantes, a grandeza introduzida pela ICRU é o ***Equivalente de dose direcional*** (Directional dose equivalent) – H’ (0,07, **Ω**). A definição desta grandeza, em um dado ponto de interesse do campo de radiação, é ***o equivalente de dose que seria produzido pelo correspondente campo de radiação expandido na esfera ICRU a uma profundidade de 0,07 mm do raio, na direção específica, Ω***. (ICRU, 1985).

Na monitoração de área para radiação pouco penetrante, H’ (0,07, **Ω**) é usado geralmente para a estimativa da dose-pele.

De um modo geral, medidas do equivalente de dose ambiental, H*(d), a uma dada profundidade, “***d***”, requerem que o campo de radiação seja uniforme em toda a extensão do

detector ou dosímetro e que o instrumento tenha uma resposta isotrópica, isto é, independente da direção de incidência da radiação.

É importante também ressaltar que o principal objetivo das novas grandezas é o de possibilitar a estimativa do equivalente de dose efetiva, que é uma grandeza não diretamente mensurável.

Na Tabela 3 estão apresentadas as novas grandezas operacionais para monitoração pessoal e de área.

Tabela 3: Novas grandezas operacionais do ICRU

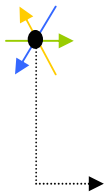
Radiação externa	Limite de dose corpo	Novas quantidades	
		Dose área	Dose pessoal
Radiação fortemente penetrante	Dose Efetiva	H*(10) (equivalente de dose ambiental)	$H_p(10)$ (equivalente de dose pessoal)
Radiação fracamente penetrante	Dose-pele	H'(0,07, **Ω**)	$H_p(0,07)$
	Dose-Cristalino	H' (3,**Ω**)	$H_p(3)$

Para todos os tipos de radiação, as novas grandezas para monitoração de área têm sido definidas com base na ***esfera ICRU*** que é composta de material equivalente ao tecido humano com 30 cm de diâmetro (densidade de 1g/cm^3, composição de massa de 76,2% de oxigênio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogênio e 2,6% de nitrogênio) (ICRU, 1985); sendo, portanto, aproximada à composição do corpo humano no que diz respeito ao espalhamento e atenuação de campo de radiação considerado.

Na composição da definição das novas grandezas para monitoração de área, os conceitos de ***campos de radiação expandidos e alinhados***, foram introduzidos e são campos derivados de campos de radiação reais (ICRU, 1985).

Um campo de radiação expandido corresponde ao campo de radiação no qual a fluência espectral e a angular têm os mesmos valores em todos os pontos de um volume suficientemente grande e igual aos valores no ponto de interesse. Há, portanto, uma homogeneidade do campo de modo que em caso de uma expansão do alcance, as fluências espectral e angular das partículas incidentes na esfera imaginária de 30 cm de diâmetro não irão variar.

As Figuras 2 e 3 mostram a representação esquemática do campo real e do campo expandido (ALBERTS et al, 1995).



Ponto P

Figura 2: Campo de radiação real com a fluência em um ponto P, que é composto de três componentes de diferentes direções, simbolizadas por três diferentes setas (ALBERTS et al, 1995).

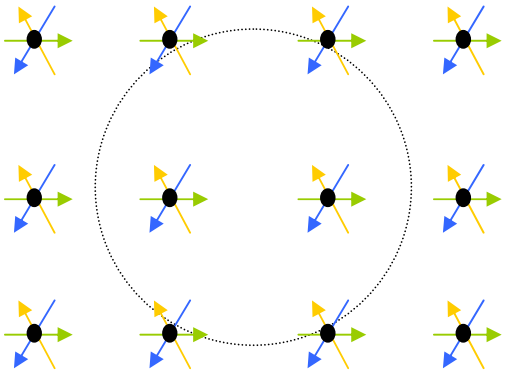


Figura 3: Campo de radiação expandido do ponto P, com a esfera ICRU representada pelo círculo para ilustrar o tamanho do campo de radiação (ALBERTS et al, 1995).

A expansão do campo de radiação assegura que toda a esfera ICRU estará exposta a um campo de radiação homogêneo cuja fluência, distribuição de energia e distribuição direcional são as mesmas que no ponto de referência ***P*** do campo de radiação real.

O segundo novo conceito é o de ***campo alinhado***. Muitos instrumentos destinados a medidas de radiação penetrantes são projetados para terem uma resposta isotrópica, isto é, para responderem igualmente às radiações vindas de todas as direções.

Na definição do equivalente de dose ambiental o conceito de um campo alinhado é introduzido: o qual tem a mesma fluência e distribuição de energia que o campo real, mas difere assumindo que toda a radiação vem de uma única direção (ALBERTS et al, 1995) (Figura 4).

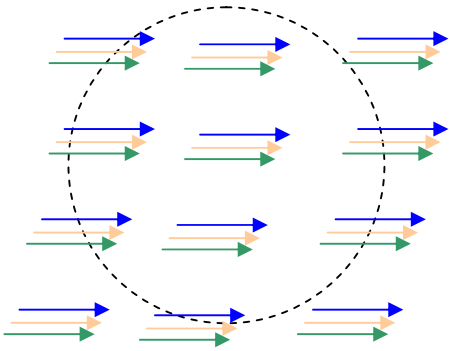


Figura 4: Campo de radiação alinhado, com a esfera ICRU representada pelo círculo para ilustrar o tamanho do campo de radiação. As setas representam as três componentes superpostas em cada ponto**.**

O conceito, portanto tem o efeito de fazer com que essa grandeza seja medida por instrumentos cuja resposta seja isotrópica. Outra importante e intencional conseqüência do conceito de alinhamento de campo é que é improvável que o equivalente de dose ambiental, H*(10), seja menor que o equivalente de dose recebido no campo de radiação real em um ponto a 10 mm abaixo da superfície do corpo irradiado.

Se todos os feixes estão alinhados no campo de radiação expandido de maneira que eles estão opostos ao vetor raio $\vec{\Omega}$ especificado pela esfera ICRU (Figura 5), o alinhamento e a expansão do campo de radiação é conseguido. Neste campo de radiação, a esfera ICRU está homogeneamente irradiada em uma direção e a fluência desse campo de radiação é a integral da fluência angular em um ponto de referência ***P*** em um campo de radiação real sobre todos os ângulos.

Na expansão e alinhamento do campo de radiação, o valor da dose equivalente em um ponto da esfera ICRU é independente da distribuição direcional e do campo de radiação real.

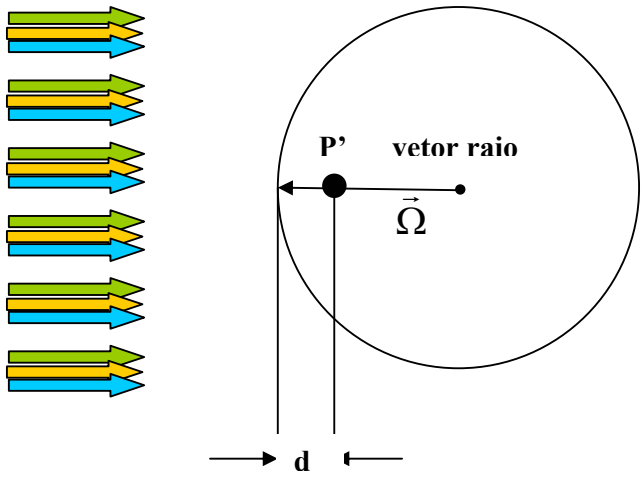


Figura 5: Geometria de irradiação da esfera ICRU em um ponto P' na esfera, em que o equivalente de dose é determinado em um campo de radiação expandido e alinhado (ALBERTS et al, 1995).

Em princípio, a dose efetiva, pode ser obtida com base em cálculos computacionais da distribuição de dose em um phantom antropomórfico[5]. Da mesma forma, o equivalente de dose ambiental pode ser calculado em uma esfera ICRU. Este fato permite a comparação dos resultados obtidos pelos instrumentos desenvolvidos para medir a grandeza operacional H*(10) e a correspondente dose equivalente efetiva que pode ser recebida por um indivíduo na mesma posição da localização do instrumento, desprezando as diferenças entre o phantom e o indivíduo.

A Figura 6 mostra a razão entre os valores do equivalente de dose ambiental, H*(10) e a dose equivalente efetiva, H_E, obtidos para este cálculo para diferentes condições de irradiação do phantom em um feixe de fótons paralelo e unidirecional (SABOL, WENG, 1995).

As condições de irradiação são as seguintes: o feixe é paralelo e unidirecional e a fluência através do volume do phantom é constante. Na geometria de irradiação AP, o feixe é orientado na direção Antero-posterior, enquanto que na PA a irradiação é na direção póstero-anterior.

Na geometria rotacional o feixe da radiação é horizontal e o phantom é girado ao redor do eixo vertical. Na irradiação isotrópica o phantom antropomórfico é girado tanto no eixo horizontal como no vertical.

---

[5] Material utilizado em irradiações e que pode substituir, estruturalmente, tecidos ou órgãos do corpo humano.

Observando os dados do gráfico apresentado na Figura 6, pode-se concluir que o equivalente de dose ambiental superestima o valor do equivalente de dose efetivo correspondente. A melhor aproximação entre as duas grandezas é obtida na geometria de irradiação AP em que a superestimativa do H_E ocorre apenas para fótons com energia inferior a 40 keV.

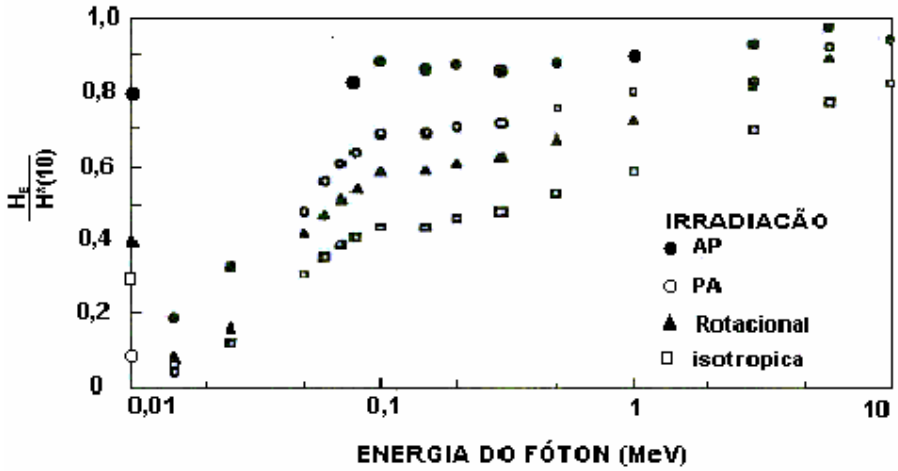


Figura 6: Relação entre H_E e H*(10) versus energia do fóton sobre condições de irradiação variadas (SABOL, WENG, 1995).

A relação entre o equivalente de dose ambiental, H*(10) e o Kerma no ar, K_{ar}, é dada pela Equação 4 estabelecida por Wagner (WAGNER et al, 1985).

$$\frac{H^*(10)}{K_{ar}} = \frac{x}{ax^2 + bx + c} + d \times \arctan(gx) \quad \text{(Sv/Gy)} \qquad (4)$$

onde

$x = \ln (E/E_o)$, $20 \text{ keV} < E < 10\text{MeV}$, E = Energia do fóton (keV) e $E_o = 9{,}85$ keV

a = 1,465 b = -4,414 c = 4,789 d = 0,7006 g = 0,6519

arctang é em radianos.

Essa relação é ilustrada na Figura 7, bem como a relação entre H*(10) e a exposição, em röntgen (R).

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos fatores de conversão obtidos através de medidas realizadas com a esfera ICRU e apresentados no Safety Report Series 16 (IAEA,

1999) e na ISO 4037-3 (ISO 4037-3, 1997) e os obtidos através da fórmula empírica de Wagner (WAGNER et al, 1985).

Observa-se pelos dados que, com exceção da energia de 20 keV, a concordância entre os valores obtidos pelos dois métodos é muito boa, com um percentual de variação da ordem de 4%.

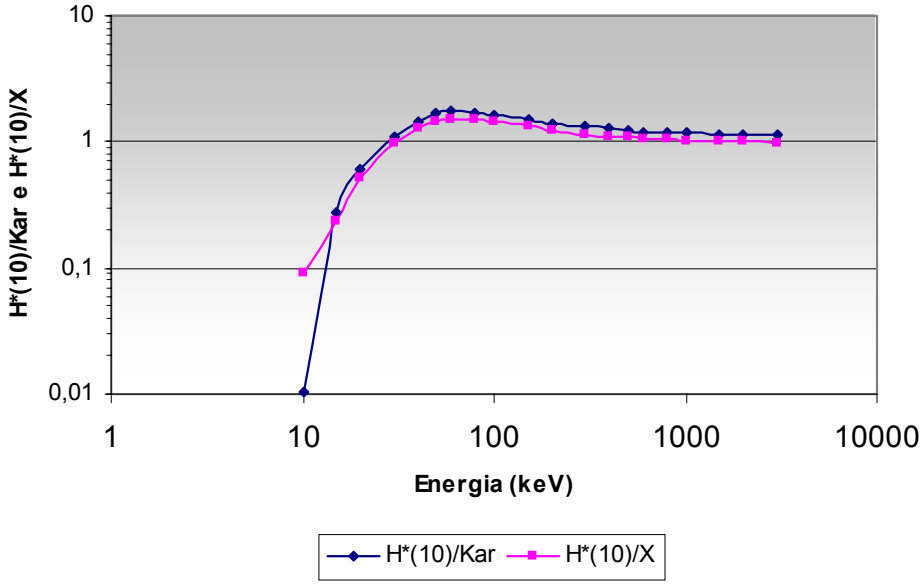


Figura 7: Relação do H*(10) com o Kerma no ar e exposição

Tabela 4: Variações percentuais para valores de fatores de conversão para H*(10)

Energia média (keV)	Fatores de conversão para H*(10) (Sv/Gy)		
	Safety Report Series 16 e ISO 4037-3	Fórmula empírica de Wagner	Variação percentual (%)
20	0,52	0,598	13,04
24	0,80	0,809	1,11
33	1,18	1,226	3,75
48	1,59	1,637	2,87
65	1,73	1,748	1,03
83	1,71	1,710	0,01
100	1,64	1,645	0,30
118	1,58	1,581	0,06
Cs-137	1,20	1,202	0,17
Co-60	1,16	1,158	-0,17

É importante notar que os coeficientes de conversão fornecidos na Tabela 4 são aplicados apenas para a geometria de irradiação unidirecional com o ponto de referência no raio da esfera ICRU, oposto à direção de incidência do campo.

Observa-se pelo gráfico apresentado na Figura 7 que a razão entre o equivalente de dose ambiental, H*(10), e o Kerma no ar tem um valor praticamente constante para fótons de alta energia, apresenta um valor máximo para a energia em torno de 80 keV e decresce significativamente para fótons com energias mais baixas.

Para calibração dos monitores de área na nova grandeza, o ponto de referência do detector deve ser posicionado no centro do campo de radiação e no ponto em que o valor do Kerma no ar seja conhecido. A calibração é efetuada com o monitor no ar, sem a presença de um phantom. O valor da indicação obtida no monitor é multiplicado pelo valor do fator de conversão $H^*(10)/K_{ar}$ para a dada energia de calibração.

Cuidados especiais devem ser adotados para medidas em campos de radiação com energia muito baixa, próxima de 20 keV, uma vez que o fator de conversão, nesta região, varia significativamente com a energia (ICRU, 1992).

2.3 RESPOSTA DOS MONITORES DE ÁREA EM TERMOS DE H*(10)

Para a monitoração de área são utilizados diversos tipos de detectores tais como detectores Geiger Muller (GM), câmaras de ionização, cintiladores, etc. Dentre estes, os detectores GM são os mais utilizados, pois, apesar de não fornecerem informações sobre tipo e energia da radiação, possuem grande vantagem de serem portáteis, de simples construção, resistentes às condições adversas de temperatura e pressão e de baixo custo.

Os equipamentos com detectores câmaras de ionização e proporcionais, apesar de fornecerem informações qualitativas e quantitativas da radiação, possuem a desvantagem da extrema sensibilidade às condições ambientais e elétricas, sendo equipamentos robustos para serem transportados com freqüência, além de serem mais caros que os monitores GM.

A Tabela 5 mostra as principais características dos detectores de radiação utilizados em monitoração de área.

Para o uso do monitor para a medida do equivalente de dose ambiental em todas as condições de irradiação, é necessário, em princípio, que o instrumento tenha uma resposta angular isotrópica e com características de retroespalhamento similares à esfera ICRU (ICRU, 1988; ICRU, 1992).

Os monitores de área atualmente em uso são, de modo geral, projetados para fornecerem medidas de exposição ou de equivalente de dose. O seu uso para medidas de H*(10) pode

apresentar uma variação significativa de resposta para as diferentes energias do feixe. De fato, os coeficientes entre $H^*(10)/K_{ar}$ e $H^*(10)/X$ variam com a energia da radiação conforme mostrado na Figura 7. Logo um dado instrumento que apresente uma resposta com pequena dependência energética para medidas de exposição, pode apresentar uma grande variação para medidas em $H^*(10)$.

Para energias acima de 0,2 MeV a diferença é pequena, enquanto que, para energias inferiores a este valor, há uma grande diferença entre a resposta de monitores para exposição e equivalente de dose ambiental (ICRU, 1988).

Tabela 5: Principais Características dos detectores de radiação empregados para monitoração de área (IPEN,1992).

	CÂMARA DE IONIZAÇÃO	CONTADOR PROPORCIONAL	CONTADOR GEIGER MÜLLER	CINTILADOR
Intervalo de medida	1μGy/h a 10 Gy/h . Para medidas sensíveis, Câmaras de grandes volumes ou pressurizadas. Câmaras especiais com limite de detecção inferior reduzido e superior aumentado	100 nGy//h a 100 mGy/h. Mede altas taxas de dose se é operado como uma câmara de ionização normal.	< 20 nGy a 10 Gy/h. Contadores especiais com limite dose aumentado. Intervalo típico de medidas para instrumentos comerciais: 100 nGy/h a 5 mGy/h.	< 10 nGy/h o limite superior de detecção depende de seu tamanho. Taxa de dose pequena: Contador de pulso. Taxa de dose alta: Indicação por corrente.
Dependência energética	Independente dentro de ± 5% para 10 keV a 2 MeV, se estão construídas adequadamente (espessura e material da parede)	Idem à câmara de ionização.	Grande. (±15 % com filtração adequada entre 0,1 a 2)MeV.	Os cintiladores orgânicos no modo corrente são independentes da energia dentro de ± 10%. No intervalo de 15 keV a 2 MeV.
Medida de radiação beta	E_β max > 0,2 MeV, ± 5%. Câmaras de placas paralelas com janela fina.	E_β max > 1 MeV somente para uma indicação qualitativa.	E_β max > 1 MeV somente para uma indicação qualitativa.	E_β max > 0,2 MeV, ± 10%. Somente com instrumentos especiais.
Dependência com a taxa de dose	Pequena. Tensão suficientemente alta para evitar o efeito da recombinação	Idem à câmara de ionização ou melhor.	Grande. Função do tempo morto. Perigo de redução da indicação da taxa de dose. Saturação do tubo GM.	Somente em caso de sobrecarga nos dinodos. Adequado para medidas de feixes pulsantes porque não existe recombinação.
Condições ambientais	Mecanicamente sensíveis, principalmente as câmaras com parede fina. Influência da pressão e temperatura geralmente < 10 %.	Mecanicamente sensível. Outras condições ambientais insignificantes.	Robusto e mecanicamente estável. Condições ambientais insignificantes.	Fotomultiplicadora mecanicamente sensível. Pequena variação com as condições ambientais. Influência da temperatura no rendimento de luminescência.
Características eletrônicas	Tempo de resolução grande devido à alta resistência de entrada. Circuito eletrônico sensível.	Alta tensão e extremamente estáveis.	Circuito simples e de grande confiança.	Circuito mais complexo que o do contador GM. Problemas de ruído em baixas energias.
Aplicações	Dispositivos relativamente leves e universalmente aplicados para fótons ou beta de todas as energias, principalmente em medidas de controle operacional e de rotina e freqüentemente medidas de segurança.	Sondas pequenas comparadas com Câmaras de ionização e aplicados principalmente para propósitos especiais como medidas de protótipos em taxas de dose baixas e em campos eletromagnéticos.	Leve, robusto, altamente empregado em medidas operacionais e de rotina em campos de radiação gama. Não é adequado para raios-X. Detector mais adequado para medidas de segurança.	Mais leve que a câmara de ionização. Universalmente aplicado em modo corrente com cintiladores orgânicos. Cintiladores inorgânicos, NaI, em modo pulso é similar ao contador GM. Não é resistente. È limitado para propósitos especiais tais como medidas de feixes de radiação pulsada, em presença de campos eletromagnéticos, taxa de dose baixa e radiação beta.

Trabalhos realizados por Thompson (1989) procuraram estudar a resposta de vários monitores de área utilizados na Central Elétrica do Reino Unido visando a implementação das novas grandezas da ICRU. Neste trabalho, ele avaliou monitores de área com câmara de ionização, cintiladores sólidos e detectores GM. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos para monitores comerciais com câmaras de ionização, cintiladores e os detectores GM.

Tabela 6: Variação em equivalente de dose ambiental, da resposta de instrumentos comerciais com a variação da energia do fóton, utilizando-se câmaras de ionização, cintiladores e Geiger Müller. (resposta normalizada para o ^{137}Cs, 662 keV). (THOMPSON, 1989)

CÂMARA DE IONIZAÇÃO		QUALIDADE ISO (Baixa taxa de dose)										
		ENERGIA MEDIA (keV)										
										^{226}Ra	^{60}Co	^{16}N
Marca	Modelo	30	48	60	87	109	148	185	211	810	1250	6130
Eberline	R010	0,91	0,89	0,87	0,89	0,86	0,88	0,88	0,94	-	-	0,71
Nuclear Enterprises	0030	0,45	0,67	0,72	0,82	0,78	0,77	0,77	0,78	1,03	1,05	1,05
Nuclear Enterprises	0500	0,66	0,65	0,64	0,80	0,90	0,99	0,91	0,90	-	0,93	-
Victoreen	440RF	0,89	0,68	0,73	0,82	0,85	0,90	0,90	0,88	-	-	-
CINTILADOR SÓLIDO (NaI)												
Eberline	PRM end on*	1,79	6,55	9,32	1,4	8,22	6,91	4,95	5,04	-	-	-
	PRM back on*	1,77	7,16	10,2	10,8	9,34	7,23	5,42	5,05	-	-	-
GEIGER MÜLLER												
Mini Instruments	900	0,36	0,58	0,60	0,62	0,73	0,87	0,89	0,83	1,02	1,18	-
Nuclear Enterprises	PDR1 end on	0,94	1,13	1,08	1,05	1,04	1,05	1,14	1,41	-	-	-
Nuclear Enterprises	PDR2 end on	0,65	0,89	0,96	0,93	0,98	1,05	0,88	0,96	-	-	-
Eberline	E 400	0	0,02	0,22	0,86	0,84	1,04	0,96	0,91	-	1,26	2,40
Eberline	E 520	0,19	0,50	0,59	0,63	0,50	0,76	0,68	0,44	-	-	-

*Os termos "end on" e "back on" referem-se respectivamente à janela do detector aberta e fechada.

Trabalhos realizados por Grecco et al (2001) procuraram avaliar a resposta de um protótipo do monitor de área MIR 7026 desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). Os resultados obtidos para a resposta em H*(10), normalizada para o ^{137}Cs, obtidos com o detector GM interno ao monitor são apresentados na Figura 8.

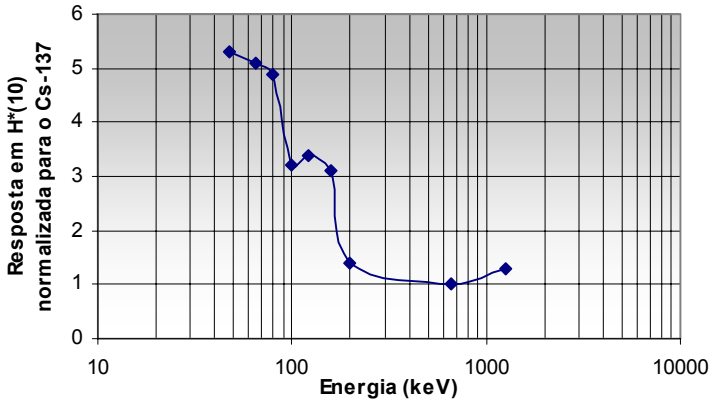


Figura 8: Resposta energética para H*(10) do MIR 7026 (GM sem filtro de compensação) (GRECCO, 2001)

Os resultados mostram que o equipamento apresenta uma grande dependência energética na sua resposta para feixes de baixa energia, não atendendo aos requisitos da Norma IEC 60846 (2001) segundo a qual a resposta em equivalente de dose do monitor não deve variar mais que ± 35% para fótons com energia entre 30 keV e 200 keV, bem como entre 1,5 MeV e 10 MeV. Para energias entre 200 keV e 1,5 MeV a resposta do instrumento não deve variar mais que ± 15%.

Para adequar a resposta do instrumento em termos de H*(10) de acordo com a IEC 60846 (IEC, 1999) os autores desenvolveram filtros compensadores de energia que foram colocados na frente do detector. Utilizando o filtro confeccionado com chumbo e latão e com 20 mm de área vazada (furos concêntricos) foi possível obter uma melhoria na dependência energética da resposta do monitor, com um desvio máximo relativo de + 31% na faixa de 48 keV a 1250 keV (Figura 9).

Estudos realizados por Ramos (1994) com o monitor Nortron NDG 1000, cujo detector GM interno possui um filtro compensador para energia feito de latão, mostram que a resposta do monitor para a nova grandeza, H*(10), teve menos dependência energética com a utilização do filtro compensador, os resultados estão apresentado na Figura 10.

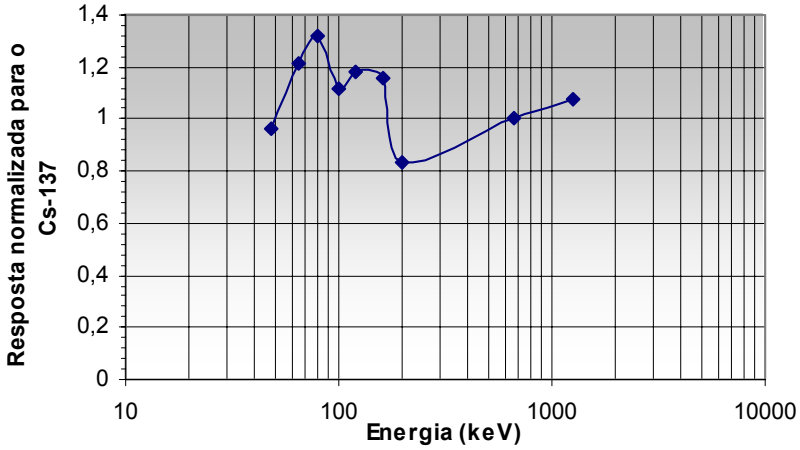


Figura 9: Resposta do monitor MIR 7026 em termos de H*(10) em função da energia da radiação para detector GM com filtro (GRECCO, 2001)

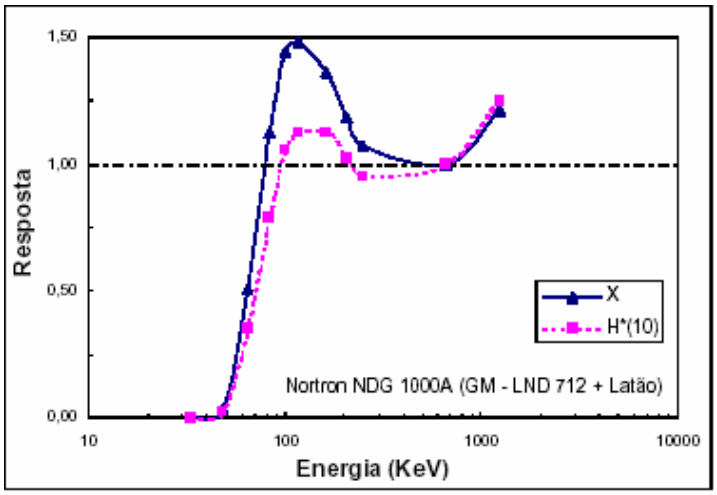
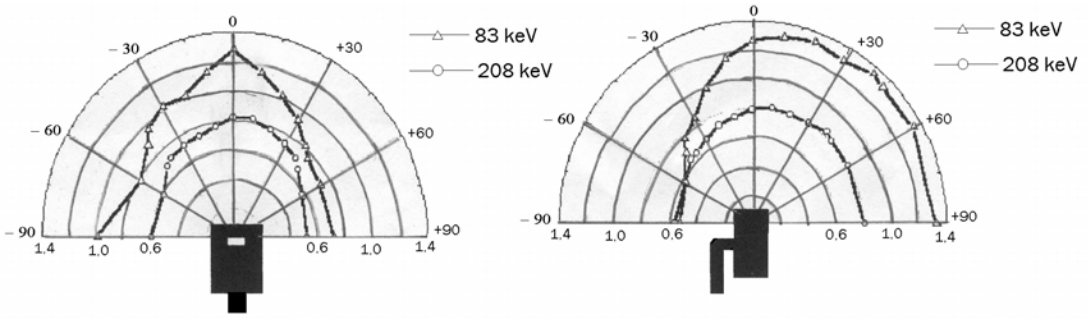


Figura 10: Resposta do monitor GM em função da energia, para exposição, X, e equivalente de dose ambiental, H*(10). Resposta não compensada para exposição. (RAMOS, 1994).

Além da dependência energética é muito importante o estudo da resposta do monitor em função do ângulo de incidência da radiação. Neste sentido, a Norma IEC 60846 (2001) exige que a variação da resposta do monitor seja menor ou igual a ± 25% para ângulos de incidência da radiação variando de 0° a +90, normalizada para a radiação do ^{137}Cs. Vale a pena ressaltar que na Norma IEC 60846 de 1999 (IEC, 1999), o valor do limite para variação da resposta do monitor para ângulos entre 0° e +90° era de ± 40%. Na prática a variação angular da resposta depende da forma e da construção do contador Geiger, do filtro utilizado e do instrumento no

qual ele é montado. Geralmente a resposta do monitor com o feixe na direção do eixo do contador é menor do que a incidência da radiação perpendicular ao eixo do detector (ICRU, 1992).

A Figura 11 mostra os resultados da resposta do monitor MIR 7026 obtidos por Grecco et al (2001) com o detector compensado com filtro de chumbo e latão.



a) Plano horizontal **b)** plano vertical

Figura 11: Resposta angular do MIR 7026 normalizada para o ^{137}Cs a 0° nos planos horizontal e vertical , respectivamente. (GRECCO, 2001)

Os resultados mostram que a resposta do monitor apresentou um desvio de +33% para a energia de 83 keV e ângulo de incidência de + 45° irradiado no plano vertical.

3. METODOLOGIA

Para avaliação da resposta dos monitores de radiação em termos da grandeza equivalente de dose ambiental, H*(10), foram selecionados sete equipamentos de marcas e modelos mais utilizados em indústrias e hospitais do país, mostrados na Tabela 7 e que são recebidos para calibração pelo Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (LMRI-DEN/UFPE). Na Tabela 8 são apresentadas as principais características operacionais desses monitores, segundo os dados dos fabricantes.

Tabela 7: Equipamentos monitores de área calibrados em H*(10).

N°	MARCA	MODELO	TIPO DO DETECTOR	LOCALIZAÇÃO	TIPO DE INDICAÇÃO
1	DOSIMETER	3009 A	GM*	INTERNA	Analógica
2	IEN CNEN BRASIL	MIR 7026	GM	INTERNA	Digital
3	GRAETZ	GPD 100	GM	INTERNA	Digital
4	GRAETZ	X5DEx	GM	INTERNA	Digital
5	LUDLUM	3	GM	EXTERNA/ 44-38	Analógico
6	VICTOREEN	190I	GM	INTERNA	Digital
7	INOVISION	451P	CI**	INTERNA	Digital

* GM – Geiger Muller
** CI – Cämara de Ionização

Tabela 8: Características operacionais dos monitores analisados neste trabalho, segundo dados do fabricante.

MONITOR		CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS				
Marca	Modelo	Intervalo de energia	Intervalo de resposta	Escalas	radiação	Dependência energética
Dosimeter	3009A	80 a 1250 keV	0-1R/h	x1, x10, x100	γ e X	±30% de 80 keV a 1250keV
IEN CNEN BRASIL	MIR 7026	NI*	Até 5R/h	Automática	γ e X	4% para ^{137}Cs
Graetz	GPD 100	48keV a 2MeV	0,1μSv/h – 1Sv/h	Automática	γ e X	NI
Graetz	X5DEx	48keV a 1,3MeV	0-20mSv/h	Automática	γ e X	NI
Ludlum	3	60keV a 1,3MeV	0-20mSv/h	x 1, x 10, x100	β, γ e X	±15% de 50 keV a 1250keV
Victoreen	190 I	Acima de 25keV	10μR/h – 1R/h	Automática	γ e X	±20% de 50 keV a 1250keV
Inovision	451P	Acima de 25keV	0-5R/h	Automatica	β, γ , X	±20% de 35 keV a 100 keV e ±15% de 100 keV a 1000keV

* NI: Não informado.

Como fontes de radiação foram utilizadas as fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs cujas atividades respectivamente em 6/11/1997 e 29/10/1997 eram de 37 GBq e 740 GBq. Estas fontes estão localizadas no irradiador STS[6] modelo OB85/3 localizado no LMRI-DEN/UFPE. Foi também utilizado o aparelho de raios-X de potencial constante da marca Pantak, modelo HF 420, com ânodo de tungstênio (W) e janela de berílio (Be) de 2 mm de espessura. A precisão e repetitividade da tensão deste aparelho são melhores que ± 1% e ± 0,03% respectivamente, com um "ripple" menor que 0,15% para uma freqüência de 15 kHz. A precisão e a repetitividade para corrente do tubo são de ± 1% e ± 0,03%, respectivamente. Na saída do tubo de raios-X foi colocado um colimador de chumbo que possibilita a obtenção de um campo de radiação de 8,3 cm de diâmetro a 100 cm do foco do tubo.

O sistema de irradiação consiste de um conjunto de trilhos com um suporte para posicionamento dos monitores de área no centro do feixe de radiação, como mostra a Figura 12.

[6] STS – Steuerungstechnik & Strahlenschutz GmbH.

Figura 12: arranjo experimental para irradiação de equipamentos em raios-X.

A mesa posicionadora possibilita o movimento nos três eixos (x,y,z). Um sistema de duplo laser, um fixado na direção paralela ao eixo, em sentido oposto e o outro, em direção perpendicular ao feixe, fixado no carrinho, possibilita o posicionamento reprodutível do detector de radiação no ponto central do feixe de raios-X.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO FEIXE DE RADIAÇÃO

3.1.1 FEIXES DE RAIOS-X

Para a realização das medidas, inicialmente o feixe de raios-X foi caracterizado e implementadas as qualidades para espectro estreito segundo a International Organization For Standardization (ISO). Para tanto, determinou-se inicialmente, o valor da camada semi-redutora para os feixes de radiação obtidos com as qualidades estabelecidas pela ISO 4037-1 (ISO 4037-1, 1996) e apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Características do feixe de raios-X qualidade espectro estreito segundo IS0 4037-1

Qualidade do feixe de raios-X	Energia média (keV)	Tensão do Tubo (kV)	Filtração Adicional	1ª CSR (mm)	2ª CSR (mm)
N-15	12	15	0,5 mmAl	0,14Al	0,16Al
N-20	16	20	1 mmAl	0,32Al	0,37Al
N-25	20	25	2 mmAl	0,66Al	0,73Al
N-30	24	30	4 mmAl	1,15Al	1,30Al
N-40	33	40	4 mmAl + 0,2 mm Cu	0,084Cu	0,091 Cu
N-60	48	60	4 mmAl + 0,6 mm Cu	0,24Cu	0,26 Cu
N-80	65	80	4 mmAl + 2 mm Cu	0,58Cu	0,62 Cu
N-100	83	100	4 mmAl + 5 mm Cu	1,11Cu	1,17Cu
N-120	100	120	4 mmAl + 5 mm Cu + 1 mm Sn	1,71Cu	1,77Cu
N-150	118	150	4 mmAl + 5 mm Cu + 2,5 mm Sn	2,36Cu	2,47Cu

Foi utilizada a câmara de ionização de 600 cm^3 marca NE Technology Limited modelo 2575 C com capa de build up A[7] acoplada a um eletrômetro Keithley modelo 617 e posicionada a 300 cm do foco do aparelho de raios-X, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13: Arranjo experimental utilizando a câmara NE Technology modelo 2575 C para caracterização do feixe na qualidade espectro estreito ISO 4037-1.

Fixando-se a tensão do aparelho de raios-X em um valor correspondente a uma dada qualidade ISO do feixe, foi colocado na saída do tubo de raios-X o valor do filtro adicional

[7] Capa de build up ***A*** para medidas com feixes de raios-X de 20 a 250 kV e gama de 25 a 300 keV.

correspondente a esta qualidade, conforme indicado na Tabela 9. Foram efetuadas três medidas consecutivas mantendo-se a corrente fixa em 10mA. A média destas leituras foi usada como o valor de referência inicial. Para a realização das medidas das camadas semi-redutoras, utilizou-se o arranjo experimental esquematizado na Figura 14.

Para tanto, absorvedores de alumínio com 99,9999% de pureza e espessura variando de 0,02mm a 2,0mm foram posicionados entre o tubo de raios-X e a câmara de ionização.

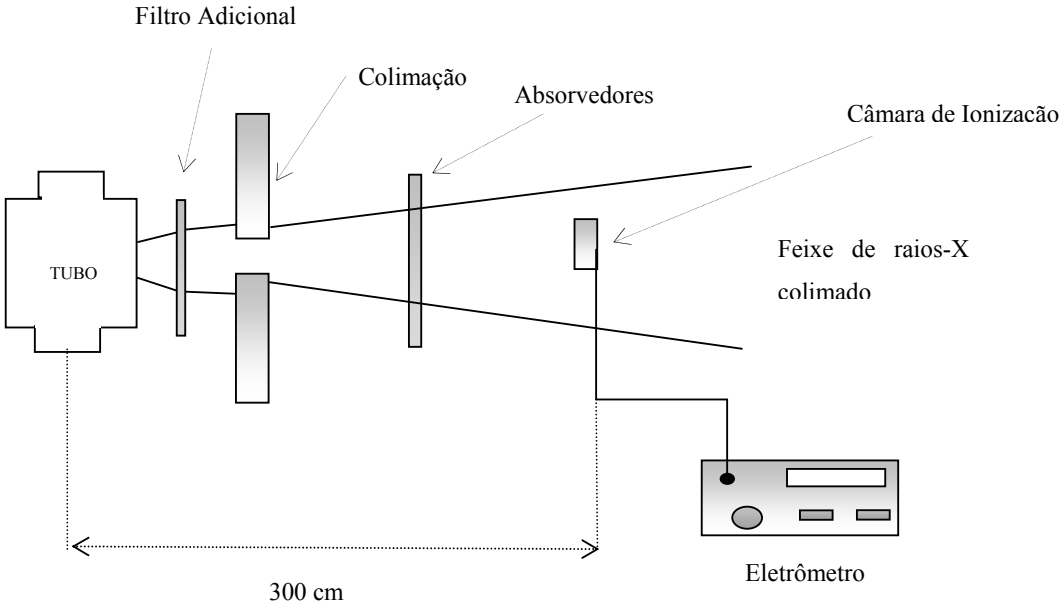


Figura 14: Arranjo experimental para medidas da CSR

Para valores de tensão acima de 30 kV, foram utilizados atenuadores de cobre com 99,999% de pureza e espessuras variando de 0,01mm a 1,0mm.

Com cada placa atenuadora foram realizadas três medidas e o valor médio foi utilizado para determinar a camada semi-redutora (CSR).

As leituras obtidas com a câmara de ionização foram corrigidas em função da temperatura e pressão pelo fator de correção obtido da seguinte equação:

$$f_{T,P} = \frac{P_0}{P} \times \frac{273{,}15 + T}{293{,}15} \tag{5}$$

onde

T é o valor resultante da média aritmética das temperaturas iniciais e finais de cada conjunto de medidas;

P é o valor de referëncia da pressão igual a 101,3 kPa

$\boldsymbol{P_0}$ é valor resultante da média aritmética das pressões iniciais e finais de cada conjunto de medidas

A partir das leituras corrigidas foram traçadas as curvas da leitura em função da espessura do absorvedor e foi determinado o valor da CSR, que corresponde à espessura necessária para reduzir a intensidade da radiação à metade. Os valores da CSR obtidos foram comparados com os valores tabelados pela ISO 4037-1.

Quando a variação entre o valor da CSR obtido e o valor tabelado na ISO 4037-1 era de 3%, pequenas alterações no valor da filtração adicional foram efetuadas, adicionando ou retirando espessuras de alumínio menores ou iguais a 0,01mm. As medidas foram repetidas, até que o valor da CSR se aproximasse do valor tabelado na ISO 4037-1.

Na Tabela 10 são apresentados os valores das CSR dos feixes de raios-X para as diferentes qualidades de radiação e utilizadas neste trabalho.

Tabela 10: Valores de CSR obtidas nos feixes de raios-X qualidade ISO implantadas no DEN/UFPE

Qualidade do feixe de raios-X	Tensão do Tubo(kV)	Filtração Adicional	1ª CSR (mm)	2ª CSR (mm)	Percentual de variação em relação à ISO 4037-1 (%)
N20	20	1 mmAl	0,32Al	0,368	- 0,5
N30	30	4 mmAl	1,15Al	1,303	+ 0,2
N40	40	4 mmAl + 0,2 mm Cu	0,084Cu	0,091	-
N60	60	4 mmAl + 0,6 mm Cu	0,24Cu	0,264	+1,7
N80	80	4 mmAl + 2 mm Cu	0,58Cu	0,627	+1,2
N100	100	4 mmAl + 5 mm Cu	1,11Cu	1,175	+0,4
N150	150	4 mmAl + 2,5 mm Sn	2.36 Cu	2,47	-

Em seguida foi determinado o valor da taxa de kerma no ar para cada qualidade do feixe de radiação. Para tanto, a câmara de ionização NE Technology 2575C foi posicionada no centro do campo de radiação a 300 cm do foco (Figura 13) e fixada a quilovoltagem e o valor do filtro adicional previamente determinados para cada qualidade de raios-X em estudo e foram efetuadas cinco (05) medidas com tempo de irradiação de um (01) minuto cada e para valores de corrente de 2, 5 e 10 mA. A média dos resultados obtidos para cada condição foi corrigida levando em consideração o fator de pressão e temperatura, o fator de calibração e o fator de sensibilidade da câmara.

Os valores das taxas de kerma no ar, $\dot{K}_{ar}$, em μGy/min foram obtidos através da Equação 6.

$$\dot{K}_{ar} = N_k \times K_q \times \overline{L} \times f_{P,T} \qquad (6)$$

onde

N_K *e* K_q são respectivamente, os fatores de sensibilidade e calibração obtidos através do certificado da câmara de ionização.

$\overline{L}$ é a média dos valores indicados por unidade de tempo,

$f_{T,P}$ é o fator de correção de temperatura e pressão.

Os valores obtidos da taxas de kerma no ar a 300 cm de distância estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores das taxas de kerma no ar obtidas a 300 cm do foco do aparelho de raios-X com correntes de tubo de 2mA, 5mA e 10 mA.

Qualidade do feixe de raios-X	1ª CSR (mm)	2ª CSR (mm)	$\dot{K}_{ar}$ em mGy/h a 300 cm do foco do RX.		
			2mA	5mA	10mA
N-20	0,32Al	0,37	4,590± 0,007	9,300± 0,081	12,740± 0,012
N-30	1,15Al	1,30	2,160± 0,043	4,590±,0,118	7,060± 0,009
N-40	0,084Cu	0,091	0,889± 0,018	1,930± 0,002	3,120± 0,067
N-60	0,24Cu	0,26	1,320± 0,026	3,020± 0,065	5,310± 0,105
N-80	0,58Cu	0,62	0,720± 0,021	1,660± 0,002	2,940± 0,007
N-100	1,11Cu	1,17	0,317± 0,008	0,735± 0,002	1,310± 0,027
N-150	2,36Cu	2,47	2,830± 0,005	6,790± 0,011	12,780± 0,365

3.1.2 FEIXES DE ^{137}Cs e ^{60}Co

Para as medidas com radiação gama foi utilizado o irradiador OB85/3 mostrado na Figura 15.

Figura 15: Irradiador STS OB85/3 com compressor responsável pelo sistema pneumático.

O irradiador contém três fontes radioativas: ^{60}Co, ^{137}Cs e ^{241}Am, que ficam armazenadas no recipiente de chumbo localizado na parte inferior do irradiador.

Através do sistema pneumático é possível deslocar a fonte desejada para o ponto central do irradiador. O acionamento do sistema pneumático é efetuado através do painel de controle, localizado na sala de comando, externa à sala do irradiador.

Um colimador, localizado na parte frontal do irradiador possibilita a colimação do feixe de radiação de modo que o diâmetro do campo de radiação seja de 20 cm a 1 m de distância.

No painel de controle é possível ajustar o tempo de irradiação de 0,01s a 999,9 horas. O irradiador possui três discos de chumbo de 11,9 cm de diâmetro que são utilizados para atenuar a intensidade do feixe de radiação e cujas espessuras são descritas na Tabela 12.

Tabela 12: Espessuras dos discos de chumbo utilizados para atenuação do feixe de radiação.

Disco de chumbo	Espessura de chumbo (cm)
Atenuador Nº 3	1,8
Atenuador Nº 2	2,2
Atenuador Nº 4	3,3
Atenuador Nº 2+3	4,0
Atenuador Nº 2+4	5,5

O sistema de irradiação é semelhante ao utilizado com o equipamento de raios-X e consiste de um banco óptico com uma mesa suporte para o posicionamento dos equipamentos. Um sistema de circuito interno de TV instalado na sala permite a visualização, pelo lado de fora da sala, do visor (display) dos equipamentos a serem calibrados. O sistema de posicionamento é controlado pelo laser frontal e o laser lateral, possibilitando a reprodutibilidade do posicionamento dos equipamentos a uma dada distância da fonte. Uma trena calibrada é fixada no trilho que suporta o "carrinho" e permite a determinação do valor da distância do equipamento à fonte de radiação.

Para a determinação das taxas de kerma no ar foi utilizada a câmara de ionização NE Technology, modelo 2575 C, com capa de build up B[8] posicionada a 200 cm da fonte de radiação e conectada ao eletrômetro Keithley, modelo 617, como mostra a Figura 16.

[8] Capa de build up ***B*** para medidas com feixes de raios-X de 300kV a 2MV e gama de 250 keV a 1500keV.

Figura 16: Arranjo experimental utilizando a câmara NE Technology com capa de equilíbrio eletrônico B para determinação dos valores de kerma no ar para as fontes de ^{137}Cs e ^{60}Co.

Foram efetuadas cinco (05) medidas com um (01) minuto de duração cada e foi calculado o valor da média. O valor da taxa de kerma no ar foi determinado pela relação dada na Equação 6 e os valores obtidos para taxa de kerma no ar a 100 cm das fontes de ^{137}Cs e ^{60}Co foram calculados utilizando a Equação 7.

$$\frac{\dot{K}_{ar1}}{\dot{K}_{ar2}} = \frac{(d_2)^2}{(d_1)^2} \qquad (7)$$

onde,

$\dot{K}_{ar1}$ é a taxa de kerma no ar obtida a uma distância d_1 de 200 cm;

$\dot{K}_{ar2}$ é a taxa de kerma no ar obtida para a distância d_2 desejada.

Como muitos monitores de área ainda fazem as medidas com as unidades de exposição, foi determinado o valor da taxa de exposição utilizando a seguinte equação:

$$\dot{R}(mR/h) = \dot{K}_{ar}(mGy/h) \times 1{,}14 \times 10^2 \qquad (8)$$

Os valores das taxas de kerma no ar e da taxa de exposição obtidos estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13: Valores da taxa de kerma no ar a 100 cm de distância da fonte de ^{137}Cs em novembro/2004

Condição	Espessura do atenuador (cm)	Taxa de kerma no ar, $\dot{K}_{ar}$, (mGy/h)	Taxa de Exposição (mR/h)
Sem atenuador	0	45,21	5138,06
Atenuador 2	2,2	3,33	377,97
Atenuador 3	1.8	5,35	608,43
Atenuador 2+3	4,0	0,44	50,07
Atenuador 2+4	5,5	0,049	5,62

Tabela 14: Valores da taxa de a 100 cm de distância da fonte de ^{60}Co em março/2005

Condição	Espessura do atenuador (cm)	Taxa de kerma no ar, $\dot{K}_{ar}$, (mGy/h)	Taxa de Exposição (mR/h)
Sem Atenuador	0	4,93	559,86
Atenuador 2	2,2	1,20	136,71
Atenuador 3	1.8	1,55	176,29
Atenuador 2+3	4,0	0,40	45,81
Atenuador 2+4	5,5	0,12	13,82

3.2 MEDIDAS EM H*(10) COM OS MONITORES DE ÁREA

Para realização do estudo da resposta dos monitores, fez-se necessário determinar os valores das taxas de equivalente de dose ambiental, H*(10), por meio dos coeficientes de conversão (Tabela 15), a partir dos valores das taxas kerma no ar.

Tabela 15: Coeficientes de conversão de kerma no ar para equivalente de dose ambiental, H*(10), $f_{c,}$ segundo a energia média utilizada, em keV (ISO 4037-3, 1997)

Energia média (keV)	**Coeficientes de conversão H*(10)/K_a, f_c ($Sv.Gy^{-1}$)**
20	0,52
24	0,80
33	1,18
48	1,59
65	1,73
83	1,71
100	1,64
118	1,58
^{137}Cs	1,20
^{60}Co	1,16

Inicialmente procurou-se verificar as condições de carga das baterias ou pilhas que alimentam o circuito do equipamento. Para tanto, colocou-se a chave seletora na posição ***bateria*** e verificou-se se a indicação correspondia ao valor da faixa correspondente ao valor de bateria, indicado no equipamento. Caso contrário, as baterias ou pilhas eram trocadas.

Em seguida, com o equipamento ligado e na ausência da radiação, verificou-se se o ponteiro do medidor estava na indicação zero do mostrador, caso contrário, o mesmo era ajustado de modo que sua indicação fosse zero (para o caso de equipamentos analógicos).

Nos equipamentos em que há no painel a indicação da faixa de tensão de operação, procurou-se verificar se o detector do instrumento estava operando dentro desta faixa de tensão. Para tanto, a chave seletora foi posicionada na posição ***HV*** e verificado se a indicação do instrumento estava dentro da faixa especificada no painel pelo fabricante do instrumento. Caso contrário, o ajuste era realizado de forma tal que a indicação no painel estivesse dentro do especificado pelo fabricante. No caso do equipamento não possuir a indicação de alta tensão, foi apenas realizado o teste das baterias.

A metodologia desenvolvida consistiu nas seguintes etapas:

a) Medida da resposta do monitor, nas suas diferentes escalas em feixes de ^{137}Cs e ^{60}Co ;

b) Idem para feixes de raios-X qualidade ISO 4037-1 para espectro estreito;

c) Avaliação das indicações do monitor em função do equivalente de dose ambiental, H*(10);

d) Estudo da dependência energética da resposta do monitor;

e) Estudo da resposta angular do monitor.

A) MEDIDA DA RESPOSTA DO MONITOR EM FEIXES DE ^{137}Cs e ^{60}Co

Cada detector foi posicionado sobre a mesa suporte do arranjo de irradiação, a uma distância ***d***, da fonte de radiação, tomando como referência o centro geométrico do detector, de modo que a taxa de kerma no ar corresponda ao valor médio de uma dada escala do equipamento.

Os detectores foram posicionados com o centro geométrico do volume sensível coincidindo com o centro do campo de radiação e perpendiculares ao feixe de radiação, como mostra a Figura 17.

Inicialmente, fixada uma escala, foi efetuada um medida com a fonte de ^{137}Cs, para o valor de taxa de kerma no ar (ou de exposição, conforme equipamento), correspondente à 50% da escala em cada avaliação.

Foram efetuadas dez medidas consecutivas e a média aritmética foi calculada e comparada com o valor de $\dot{K}_{ar}$(d) previamente calculado. Caso a tendência da medição do equipamento a 50% da escala fosse maior que ±10% do valor previamente calculado, o equipamento era ajustado variando-se o potenciômetro do circuito eletrônico correspondente à escala em estudo de modo a ajustá-la à indicação desejada.

Em seguida, variando a distância entre o detector e a fonte de radiação, foram efetuadas medições para valores correspondentes a aproximadamente 20% e 80% da escala e para cada ponto foram realizadas dez medidas e a média aritmética foi calculada e armazenada para ser relacionada com os valores de H*(10).

Utilizando-se a fonte de ^{60}Co foram efetuadas medidas em todas as escalas do monitor nas faixas correspondentes a 20%, 50% e 80% de cada escala. A média aritmética das dez

medidas efetuadas em cada ponto foi calculada e utilizada para ser relacionada com os valores H*(10).

As incertezas padrões e a incerteza expandida foram também calculadas e o procedimento adotado está descrito no item 3.3.

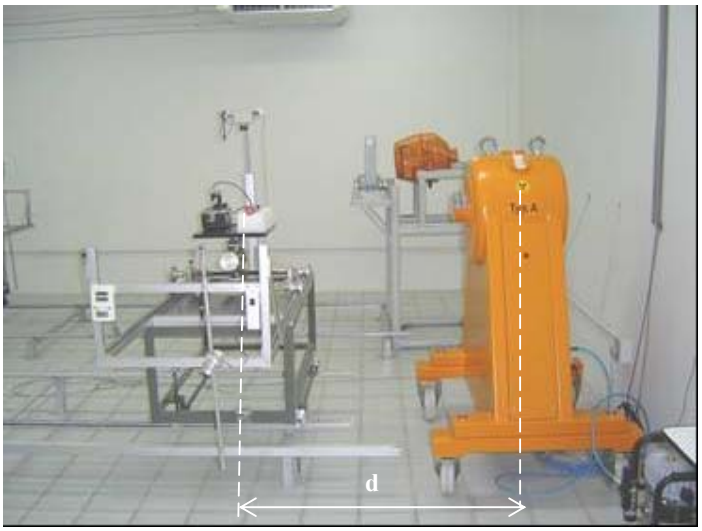


Figura 17: Arranjo experimental para irradiação dos monitores de área em feixes de ^{137}Cs e ^{60}Co.

B) MEDIDAS COM FEIXES DE RAIOS-X

A resposta dos monitores foi avaliada com os feixes de raios-X com qualidade ISO, dentro da faixa de energia estabelecida pelo fabricante como faixa útil do equipamento.

Para tanto, o monitor foi posicionado no centro do campo de radiação e medidas foram efetuadas nas diferentes escalas do monitor. A distância do monitor ao foco do tubo foi fixada em 300 cm, posição utilizada para dosimetria do equipamento com a câmara de ionização padrão, de modo a evitar a variação do espectro de emissão dos raios-X para os feixes em estudo. Foram efetuadas dez medições e a média aritmética calculada e relacionada com o valor de H*(10), conforme descrito anteriormente.

C) AVALIAÇÃO DA INDICAÇÃO DO MONITOR EM FUNÇÃO DO H*(10)

Para estimar os valores de H*(10) correspondentes aos valores de taxa de kerma no ar obtidos com a câmara de ionização padrão foram utilizados os fatores de conversão, f_c, fornecidos pelo Safety Report Series16 (IAEA, 2000) e pela ISO 4037-3 (ISO 4037-3, 1997), apresentados na Tabela 15. Os valores das taxas em H*(10), em μSv/h, foram obtidos, para cada qualidade de feixe da radiação estudada, usando a relação dada pela Equação 9.

$$H^*(10) = K_{ar} \times f_c \tag{9}$$

onde:

H*(10) é o valor da taxa de equivalente de dose ambiental obtido, em Sv/h

$\dot{K}_{ar}$ é a taxa de kerma no ar, em Gy/h

f_c é o coeficiente de conversão em Sv/Gy

Foi traçado o gráfico da indicação da leitura obtida em cada monitor em função do valor obtido em H*(10). Para os equipamentos cuja indicação é em taxa de exposição, foi efetuada a correção de resposta do equipamento para a grandeza de kerma no ar usando a Equação 10.

$$\dot{K}_{ar} = C_c \times \dot{X} \tag{10}$$

onde

C_c é o fator de conversão e igual a 8,76 x 10^{-3} Gy/R

$\dot{X}$ é a indicação do equipamento em R/h.

A partir do gráfico, foi determinado o coeficiente angular da reta de ajuste para cada qualidade da radiação.

D) ESTUDO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA

Com base nos coeficientes angulares, α, obtidos pelo gráfico que relaciona a indicação do monitor e o valor de H*(10), foi obtido o fator de sensibilidade, f_s, do equipamento o qual foi normalizado para o ^{137}Cs, através da relação dada pela Equação 11.

$$f_s = \frac{\alpha_r}{\alpha_{cs}} \tag{11}$$

onde

α_r é o coeficiente angular correspondente a cada qualidade da radiação e α_{cs} é o coeficiente angular obtido com o ^{137}Cs.

Foi traçado o gráfico do fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs em função da energia da radiação, obtendo-se assim a dependência da resposta do monitor em termos de H*(10) em função da energia.

E) ESTUDO DA DEPENDÊNCIA ANGULAR

Para o estudo da dependência angular na nova grandeza operacional, H*(10), os monitores analisados foram irradiados em ângulos de incidência da radiação variando de -90° a +90°, em relação ao eixo de referência do detector para feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co e para os feixes de raios-X qualidade espectro estreito ISO 4037-1, como mostrado na Figura 18.

O arranjo experimental utilizado para variação do ângulo de incidência do feixe de radiação nos monitores e mostrado na Figura 19, consta de dois discos concêntricos, onde o disco superior possui mobilidade para variação angular de 0° a 270°, de 15° em 15°, possuindo uma trava de fixação para o ângulo desejado.

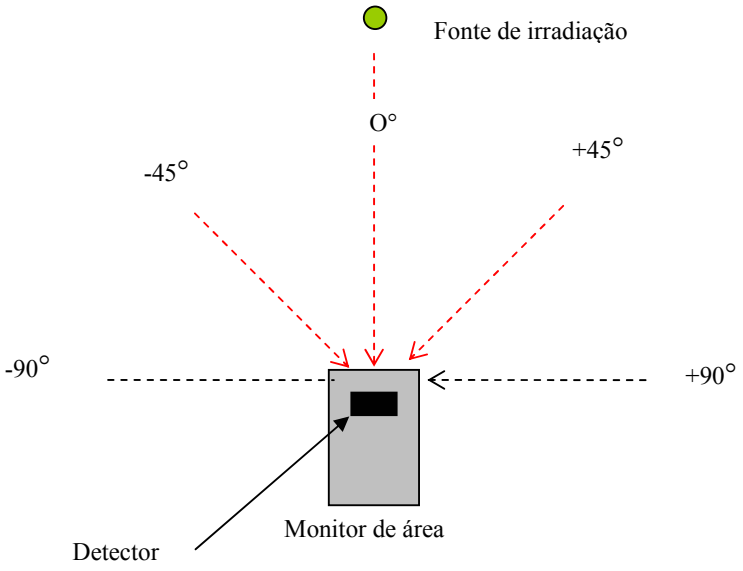


Figura 18: Ângulos de incidência considerados para irradiação dos monitores em estudo.

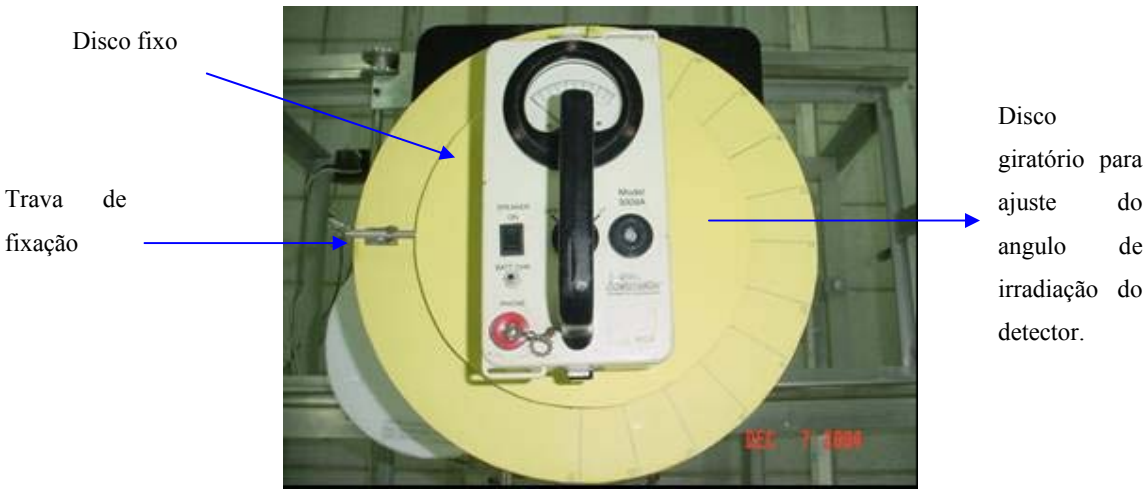


Figura 19: Arranjo experimental para variação do ângulo de incidência dos feixes de radiação nos monitores estudados.

Segundo a IEC 60846 (IEC, 2001), a dependência angular do monitor deve ser analisada para energias entre 30 keV a 1,5MeV.

Neste trabalho as análises foram realizadas com feixe de qualidade ISO N-100 (energia média de 83 keV), com feixes de ^{137}Cs e ^{60}Co e as medidas efetuadas para variações de ângulo de incidência da radiação entre -90° e +90°.

3.3 CALCULO DA INCERTEZA

A avaliação da incerteza associada à resposta dos monitores de radiação durante a sua calibração foi baseada nos procedimentos recomendados pela ISO GUM (1995).

A incerteza expandida foi calculada para cada monitor pela relação dada pela Equação 12.

$$U_{95} = k. \times u_c \tag{12}$$

onde

k é o fator de abrangência correspondente a um nível de confiança superior a 95% e u_c é a incerteza padrão combinada.

Os fatores que afetam o valor da incerteza padrão combinada são:

A) Reprodutibilidade da resposta do monitor - u_1.

Esta é uma componente da incerteza do Tipo A e foi determinada pela relação mostrada na Equação 13:

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{13}$$

onde ***s*** é o desvio padrão relacionado com o número ***n*** de resultados obtidos com o monitor. Neste caso, n foi igual a dez.

B) Resolução do monitor em estudo – u_2.

Esta é uma componente da incerteza que é do tipo B e corresponde a uma distribuição retangular. O valor da incerteza padrão devido a esta componente foi calculado através da Equação 14.

$$u_2 = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{14}$$

onde ***a*** corresponde ao menor valor de divisão da escala do monitor dividido por dois.

C) Posicionamento do monitor – u_3

A incerteza associada à componente decorrente do posicionamento do monitor é também do tipo B. Ela foi calculada levando em consideração a resolução da trena utilizada para medida da distância fonte-detector e o seu valor foi de $\frac{0,05}{\sqrt{3}}$.

D) Padrão de Calibração – u_4

A incerteza do padrão de calibração é uma incerteza do tipo B e o seu valor é obtido a partir do certificado de calibração.

Como exemplos do cálculo de incerteza para o Co-60 e feixes de raios-X, as Tabelas 16 e 17 mostram os dados utilizados para o monitor da marca Dosimeter modelo 3009A. O valor da incerteza padrão combinada foi obtido pela relação apresentada na Equação 15.

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \tag{15}$$

Os valores dos graus de liberdade efetivos (ν_{eff}) associados à incerteza combinada foram obtidos pela equação de Welch-Satlethrwaite ISO GUM (1995), dados pela expressão:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1} \frac{u_i^4}{\nu_i}} \tag{16}$$

onde

u_i é a incerteza padrão de i-ésima componente

ν_i é o grau de liberdade associado à u_i.

A partir do valor de ν_{eff} determinou-se o valor do fator de abrangência, k, utilizando-se a tabela da distribuição t-Student.

No caso da calibração com feixes e raios-X são acrescentados a esta planilha mais duas componentes de incerteza, ambas do tipo B e de distribuição retangular.

a) *Incertezas associadas à repetitividade e precisão da tensão e corrente do tubo de raios-X que correspondem a 0,03% e 1%, respectivamente.*
b) *Incerteza associada à espessura dos filtros determinada pelo certificado de calibração dos filtros e é de 1%.*

Tabela 16: Planilha para cálculo de incerteza da medição para o monitor de área Dosimeter 3009 A em feixes de ^{60}Co.

Simbolo	Componente de incerteza		Tipo de distribuição de probabilidade	Divisor	Incerteza padrão U_i	Nº de Graus de liberdade (ν)	Percentual de contribuição (%)
	Nome	Valor (+/-)					
u_1	Reprodutibilidade	$\frac{5,7}{\sqrt{10}}$	Normal (tipo A)	1	1,80249	9	$\frac{u_1^2}{u_c^2}$ =99,75%
u_2	Resolução	0,02	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	0,01157	∞	$\frac{u_2^2}{u_c^2}$ =0,033%
u_3	Posicionamento	0,05	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	0,02887	∞	$\frac{u_3^2}{u_c^2}$ =0,21%
u_4	Padrão de calibração	0,01	Normal (tipo B)	2	0,005	∞	$\frac{u_4^2}{u_c^2}$ =0,0083%
u_c	$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$ = 0,6332455 ≅ 0,63					$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{4} \frac{u_i^4}{\nu_i}}$ =9,045	
U(95,45)	$U = u_c \times k$ =1,462					k=2,32	

Tabela 17: Planilha para cálculo de incerteza da medição para o monitor de área Dosimeter 3009 A em feixes de raios-X.

Simbolo	Componente de incerteza		Tipo de distribuição de probabilidade	Divisor	Incerteza padrão U_i ( )	Nº de Graus de liberdade (v)	Percentual de contribuição (%)
	Nome	Valor (+/-)					
u_1	Reprodutibili-dade	$\frac{10,3}{\sqrt{10}}$	Normal (tipo A)	1	3,25715	9	99,99
u_2	Resolução	0,02	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	0,01157	∞	0,0013
u_3	Posicionamen-to	0,05	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	0,02887	∞	0,00786
u_4	Padrão de calibração	0,01	Normal (tipo B)	2	0,005	∞	0,00024
u_5	Repetitividade da tensão	0,0003	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	$1,7321 \times 10^{-4}$	∞	$2,83 \times 10^{-7}$
u_6	Precisão da tensão	0,01	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	$5,774 \times 10^{-3}$	∞	$3,14 \times 10^{-4}$
u_7	Repetitividade da corrente	0,0003	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	$1,7321 \times 10^{-4}$	∞	$2,83 \times 10^{-7}$
u_8	Precisão da corrente	0,01	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	$5,774 \times 10^{-3}$	∞	$3,14 \times 10^{-4}$
u_9	Espessura do filtro	0,01	Retangular (tipo B)	$\sqrt{3}$	$5,774 \times 10^{-3}$	∞	$3,14 \times 10^{-4}$
u_c	$u_c = \sqrt{u_1^2 + ... + u_9^2}$ = 3,2573177					$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{9} \frac{u_i^4}{v_i}}$ =9,0002	
U(95,45)	$U = u_c \times k =$ =7,56					k=2,32	

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MEDIDAS EM H*(10)

As Tabelas 18, 19 e 20 mostram os resultados de taxa de equivalente de dose ambiental H*(10) a partir dos fatores de conversão dos valores de taxa de kerma no ar dos feixes medidos com a câmara de ionização NE Technology 2575C com os feixes de radiação utilizados neste estudo.

Tabela 18: Valores de $\dot{H}^*(10)$ utilizados com feixes de ^{137}Cs a 1 m utilizando o coeficiente de conversão de 1,2 Sv/Gy (ISO 4037-3, 1997**)**

Condição de irradiação	**Taxa de kerma no ar,** $\dot{K}_{ar}$**,** (mGy/h)	$\dot{H}^*(10)$ (mSv/h)
Sem atenuador	45,21	54,25
Atenuador 2	3,33	3,99
Atenuador 3	5,35	6,42
Atenuador 2+3	0,44	0,53
Atenuador 2+4	0,049	0,059

Tabela 19: Valores de $\dot{H}^*(10)$ utilizados com feixes de ^{60}Co a 1 m utilizando o fator de conversão de 1,16 Sv/Gy (ISO 4037-3, 1997**)**

Condição de irradiação	**Taxa de kerma no ar, $\dot{K}_{ar}$, (mGy/h)**	$\dot{H}^*(10)$ **(mSv/h)**
Sem atenuador	4,93	5,72
Atenuador 2	1,20	1,39
Atenuador 3	1,55	1,80
Atenuador 2+3	0,40	0,47
Atenuador 2+4	0,12	0,14

Tabela 20: Valores de $\dot{H}^*(10)$ utilizados para as qualidades do feixe de raios-X a 300 cm do tubo utilizando os coeficientes de conversão dados na Tabela 15.

Qualidade do feixe de raios-X	$\dot{K}_{ar}$ (mGy/h)			**H*(10)** (mSv/h)		
	2mA	5mA	10mA	2mA	5mA	10mA
N-30	2,160	4,590	7,06	1,73	3,67	5,65
N-40	0,889	1,930	3,12	1,05	2,28	3,68
N-60	1,320	3,020	5,31	2,10	4,80	8,44
N-80	0,720	1,660	2,94	1,25	2,87	5,09
N-100	0.317	0,735	1,31	0,54	1,26	2,24
N-150	2,830	6,790	12,78	4,47	10,73	20,19

4.2 ESTUDO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA

As Tabelas 21 a 27 mostram os dados obtidos com os monitores expostos aos feixes de raios-X qualidade ISO 4037-1 e em feixes de ^{60}Co e ^{137}Cs bem como as incertezas expandidas associadas a estas medidas.

Os gráficos correspondentes a estes dados estão apresentados nos Apêndices A a G.

Tabela 21: Resposta do monitor de radiação **Dosimeter 3009 A** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-60 (48keV)	2098,8	255,8	8,0
		4801,8	466,0	6,5
		8442,9	707,8	6,5
	N-80 (65keV)	1245,6	637,0	4,7
		2871,8	1717,0	6,4
		5086,2	2803,0	3,7
	N-100(83keV)	540,0	434,5	7,4
		1260,0	1086,2	9,1
		2240,0	1962,0	5,9
	N-150(118keV)	4470,0	35740,	6,3
		10730,0	80240,0	4,1
		20190,0	12037,0	4,5
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	210,2	175,2	13,8
		525,6	438,0	6,5
		841,0	735,8	5,8
	Co-60 (1250keV)	203,2	236,5	7,9
		508,1	560,6	3,7
		812,9	876,0	3,7
	* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45% .			

Tabela 22: Resposta do monitor de radiação **Graetz X5DEx** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-60 (48keV)	2098,8	1258,6	3,5
		4801,8	2744,0	3,5
		8442,9	4798,0	3,7
	N-80 (65keV)	1245,6	1034,4	3,7
		2871,8	2394,0	3,4
		5086,2	4194,0	3,3
	N-100 (83keV)	540,0	420,4	4,8
		1260,0	1038,0	3,5
		2240,0	1988,8	3,6
	N-150 (118keV)	4470,0	2306,0	3,5
		10730,0	5604,0	3,4
		20190,0	10446,0	3,3
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	2,4	2,2	6,6
		6,0	5,4	5,6
		9,6	9,3	3,5
		24,0	20,6	5,4
		60,0	55,1	3,4
		96,0	92,7	4,0
	Co-60 (1250keV)	2,3	2,2	7,7
		5,8	5,3	3,7
		9,3	9,2	3,5
		23,2	27,1	4,1
		58,0	74,3	3,5
		92,8	119,1	3,4
	* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45%.			

Tabela 23: Resposta do monitor de radiação **Inovision 451P** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-40 (33 keV)	1049,0	491,4	4,5
		2277,4	1050,3	3,6
		3681,6	1649,9	3,4
	N-60 (48keV)	2098,8	959,8	3,6
		4801,8	2075,7	5,5
		8442,9	3637,0	3,3
	N-80 (65keV)	1245,6	617,4	3,6
		2871,8	1387,4	3,3
		5086,2	2395,1	3,3
	N-100(83keV)	540,0	280,3	4,6
		1260,0	668,8	3,5
		2240,0	1176,3	3,7
	N-150(118keV)	4470,0	2572,5	3,3
		10730,0	6120,8	3,3
		20190,0	11602,8	3,5
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	14,8	17,7	4,2
		36,0	43,2	4,1
		61,4	73,7	6,5
		145,5	174,6	3,5
		360,1	432,2	4,1
		608,5	730,2	3,6
	Co-60 (1250keV)	15,5	20,6	6,1
		38,0	51,4	4,9
		63,5	82,3	6,9
		152,2	205,8	5,4
		388,5	514,5	4,9
	* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45%.			

Tabela 24: Resposta do monitor de radiação **Ludlum modelo 3 sonda 44-38** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-60 (48keV)	2098,8	1300,0	5,1
		4801,8	2600,0	5,1
		8442,9	4300,0	6,7
	N-80 (65keV)	1245,6	1100,0	5,1
		2871,8	2400,0	5,1
		5086,2	4000,0	5,1
	N-100(83keV)	540,0	550,0	6,7
		1260,0	1260,0	9,6
		2240,0	2200,0	5,1
	N-150(118keV)	4470,0	4680,0	6,7
		10730,0	9470,0	9,4
		20190,0	18000,0	5,1
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	12,0	9,6	11,9
		30,0	25,0	9,1
		48,0	37,0	7,2
		120,0	100,0	5,1
		300,0	250,0	5,1
		480,0	360,0	5,1
	Co-60 (1250keV)	11,6	12,0	12,2
		29,0	28,0	8,8
		46,4	41,6	9,1
		116,0	130,0	5,1
		290,0	300,0	5,1
		464,0	440,0	5,6
	* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45%.			

Tabela 25: Resposta do monitor de radiação **MIR 7026** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-60 (48keV)	2098,8	1920,0	3,3
		4801,8	4480,0	3,3
		8442,9	7904,0	3,3
	N-80 (65keV)	1245,6	1316,0	3,5
		2871,8	3008,0	3,9
		5086,2	5392,0	3,3
	N-100(83keV)	540,0	545,2	3,3
		1260,0	1244,0	3,5
		2240,0	2266,0	3,3
	N-150(118keV)	4470,0	3438,0	3,3
		10730,0	8506,0	3,3
		20190,0	17160,0	3,3
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	24,0	19,7	7,0
		60,0	50,6	4,7
		96,0	78,8	3,8
	Co-60 (1250keV)	23,2	20,96	5,2
		58,0	56,44	3,8
		92,8	87,64	3,7
	* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45%.			

Tabela 26: Resposta do monitor de radiação **Graetz GPD 100** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-60 (48keV)	2098,8	1334,2	3,3
		4801,8	2990,0	3,6
		8442,9	5238,0	3,7
	N-80 (65keV)	1245,6	1031,8	3,3
		2871,8	2370,0	3,6
		5086,2	4050,0	3,3
	N-100(83keV)	540,0	482,6	3,3
		1260,0	1076,8	3,3
		2240,0	2020,0	5,5
	N-150(118keV)	4470,0	3804,0	3,6
		10730,0	8798,0	3,3
		20190,0	15826,0	3,3
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	24,0	24,0	6,1
		60,0	60,0	7,7
		96,0	96,0	3,4
	Co-60 (1250keV)	24,3	23,2	5,8
		66,3	58,0	4,6
		106,9	92,8	4,5
* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45%.				

Tabela 27: Resposta do monitor de radiação **Victoreen 190 I** em função de H*(10) para feixes de raios-X qualidade ISO e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, 0°.

	Qualidade da radiação	Taxa de H*(10) (μSv/h)	Indicação do Instrumento (μSv/h)	Incerteza expandida* (%)
FEIXES DE RAIOS-X	N-60 (48keV)	2098,8	1440,0	4,2
		4801,8	3448,0	4,0
		8442,9	6397,0	3,6
	N-80 (65keV)	1245,6	862,0	6,1
		2871,8	1966,0	4,7
		5086,2	3599,0	3,4
	N-100(83keV)	540,0	317,0	3,6
		1260,0	772,0	4,4
		2240,0	1431,0	4,3
	N-150(118keV)	4470,0	3329,0	3,7
		10730,0	8755,0	3,3
		20190,0	14349,0	7,2
FEIXES GAMA	Cs-137 (662keV)	21,0	14,3	6,7
		52,6	40,0	4,0
		84,1	68,9	4,9
		210,2	164,2	6,4
		525,6	409,1	7,1
		841,0	683,5	4,2
	Co-60 (1250keV)	20,3	19,3	5,5
		50,8	49,8	4,5
		81,3	80,4	14,0
		203,2	199,2	10,4
		508,1	523,7	5,4
		812,9	895,3	4,5
	* incerteza expandida com k=2,32 e nível de confiança igual a 95,45%.			

Os coeficientes angulares, de regressão bem como os fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs das curvas de calibração obtidas em termos de Kerma no ar e H*(10) estão apresentadas nas Tabelas 28 a 34, respectivamente.

Tabela 28: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **Dosimeter modelo 3009 A**

Energia (keV)	**Coeficiente angular K_{ar}**	**R^2**	**Coeficiente angular K_{ar}**	**Coeficiente angular H*(10)**	**R^2**	**Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs**
48	0,1129	0,998	0,11	0,0710	0,9980	0,080
65	0,9691	0,993	0,908	0,5602	0,9925	0,630
83	1,5374	1,000	1,440	0,8982	1,0000	1,010
118	0,8360	0,979	0,780	0,5292	0,9786	0,595
Cs-137	1,0667	0,9987	1,000	0,8889	0,9987	1,000
Co-60	1,2167	0,9999	1,141	1,0489	0,9990	1,180

Tabela 29: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **Graetz X5DEx**

Energia (keV)	**Coeficiente angular K_{ar}**	**R^2**	**Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs**	**Coeficiente angular H*(10)**	**R^2**	**Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs**
48	0,8876	0,9999	0,771	0,558	0,9999	0,582
65	1,4306	0,9999	1,242	0,827	0,9999	0,861
83	1,5839	0,9990	1,375	0,925	0,9988	0,964
118	0,819	0,9999	0,711	0,518	0,9999	0,540
Cs-137	1,1518	0,9986	1,000	0,960	0,9986	1,000
Co-60	1,5163	0,9996	1,320	1,307	0,9996	1,362

Tabela 30: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **Inovision 451 P**

Energia (keV)	Coeficiente angular K_{ar}	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs	Coeficiente angular H*(10)	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs
33	0,5189	0,9997	0,6110	0,440	0,9997	0,621
48	0,6716	0,9999	0,7909	0,422	0,9999	0,597
65	0,8000	0,9999	0,9421	0,462	0,9999	0,653
83	0,9001	0,9998	1,0600	0,526	0,9999	0,744
118	0,9066	1	1,0700	0,574	1,0000	0,811
Cs-137	0,8492	0,9989	1,0000	0,708	0,9989	1,000
Co-60	0,9231	0,9987	1,0900	0,796	0,9987	1,124

Tabela 31: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **Ludlum 3 sonda 44-38**

Energia (keV)	Coeficiente angular K_{ar}	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs	Coeficiente angular H*(10)	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs
48	0,7513	0,9999	0,820	0,473	0,9999	0,619
65	1,3030	0,9992	1,420	0,753	0,9992	0,986
83	1,6600	0,9999	1,812	0,970	0,9999	1,270
118	1,3456	0,9981	1,469	0,852	0,9981	1,115
Cs-137	0,9163	0,9956	1,000	0,764	0,9956	1,000
Co-60	1,1174	0,9956	1,219	0,963	0,9956	1,262

Tabela 32: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **MIR 7026**

Energia (keV)	Coeficiente angular K_{ar}	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs	Coeficiente angular H*(10)	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs
48	1,4995	1,0000	1,520	0,943	1,0000	1,149
65	1,8376	0,9999	1,865	1,062	0,9999	1,294
83	1,7356	0,9997	1,760	1,014	0,9996	1,235
118	1,3844	0,9989	1,410	0,876	0,9989	1,067
Cs-137	0,9853	0,9993	1,000	0,821	0,9993	1,000
Co-60	1,1113	0,9986	1,130	0,958	0,9986	1,167

Tabela 33: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **Graetz GPD 100**

Energia (keV)	Coeficiente angular K_{ar}	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs	Coeficiente angular H*(10)	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs
48	0,9786	1,0000	0,7695	0,616	1,0000	0,581
65	1,3568	0,9995	1,0669	0,784	0,9995	0,740
83	1,5538	0,9980	1,2218	0,908	0,9982	0,857
118	1,2054	0,9996	0,9479	0,763	0,9996	0,720
Cs-137	1,2717	0,9998	1,0000	1,060	0,9998	1,000
Co-60	0,9786	1,0000	0,7695	1,187	0,9999	1,120

Tabela 34: Fatores de sensibilidade normalizados para o ^{137}Cs encontrados para o monitor de área **Victoreen 190 I**

Energia (keV)	Coeficiente angular K_{ar}	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs	Coeficiente angular H*(10)	R^2	Fator de sensibilidade normalizado para o ^{137}Cs
48	1,2449	0,9994	0,9786	0,783	0,9994	0,714
65	1,2354	0,9995	0,9712	0,714	0,9995	0,651
83	1,1233	0,9998	0,8830	0,656	0,9997	0,598
118	1,0935	0,9883	0,8596	0,692	0,9883	0,631
Cs-137	1,2721	0,9984	1,0000	1,097	0,9984	1,000
Co-60	0,9698	0,9993	0,7620	0,808	0,9993	0,737

A partir destes resultados foram traçados os gráficos da resposta dos monitores, normalizadas para o feixe de ^{137}Cs, em termos de kerma no ar e H*(10). Os gráficos estão apresentados nas Figuras 20 e 21.

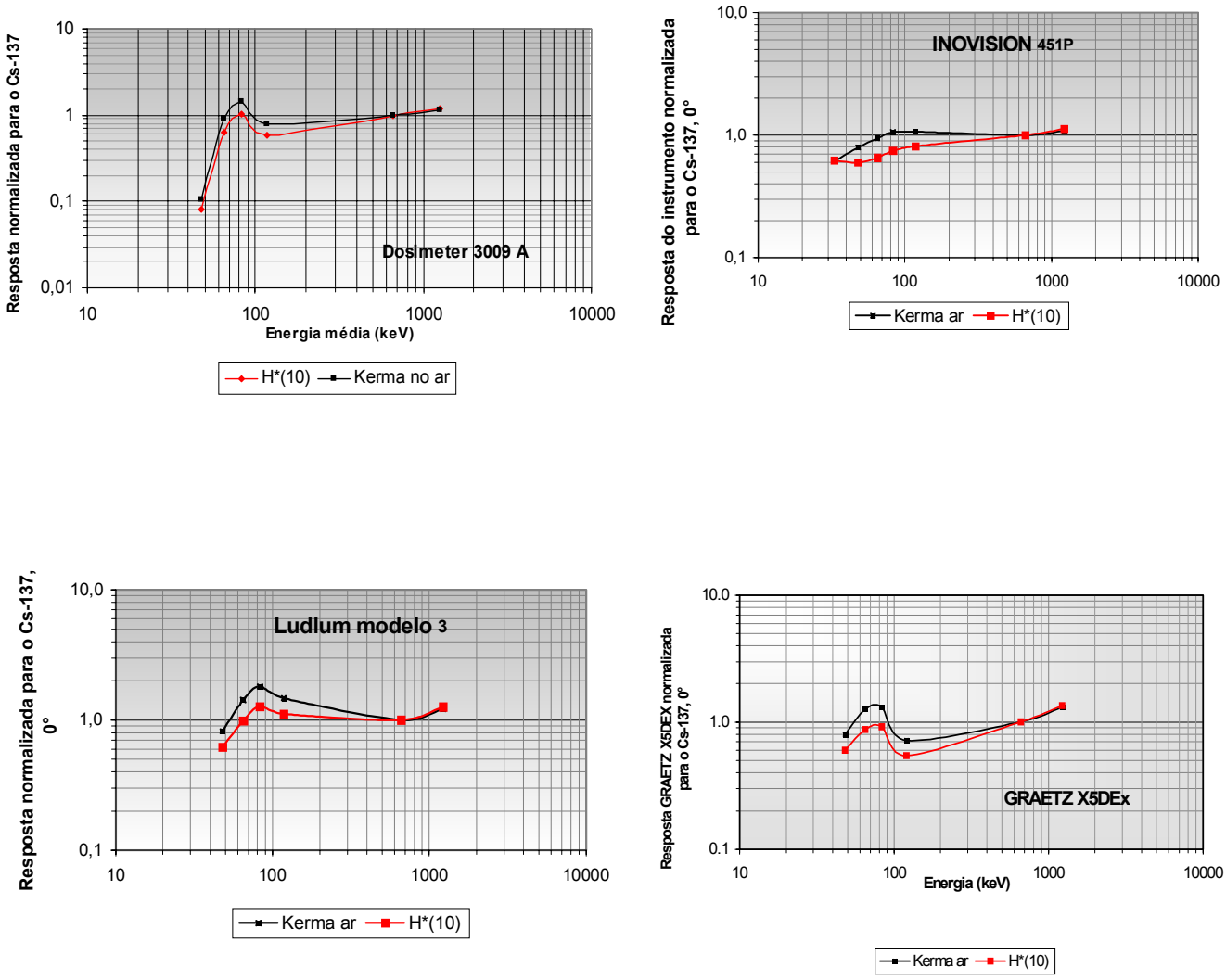


Figura 20: Variação da resposta dos monitores**,** com a energia, em termos de taxas de kerma no ar e H*(10) normalizada para o Cs-137 em incidência normal, 0°, para os monitores Dosimeter 3009A, Inovision 451P, Ludlum 3, Graetz X5DEx

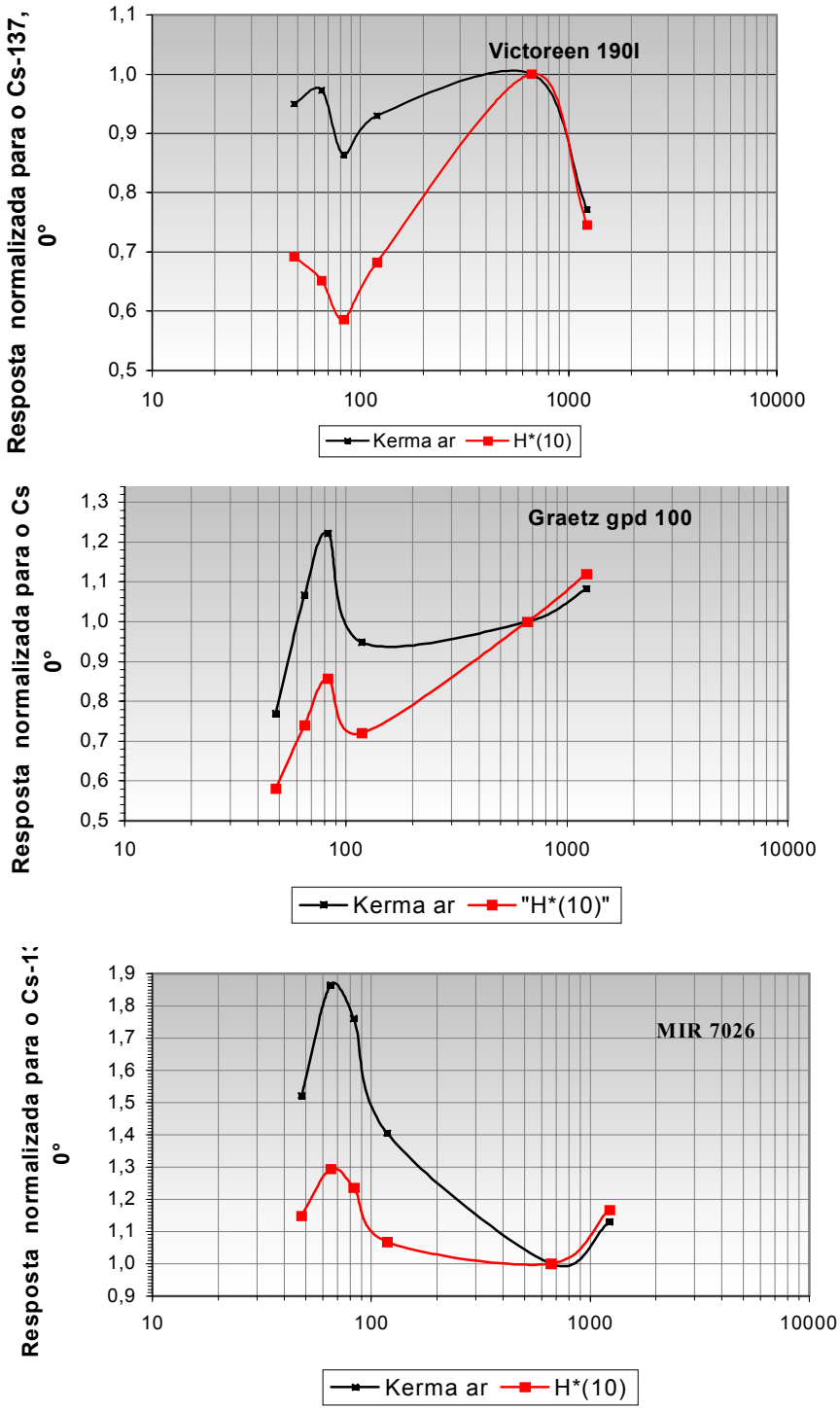


Figura 21: Variação da resposta dos monitores**,** com a energia, em termos de taxas de kerma no ar e H*(10) normalizada para o Cs-137 em incidência normal, 0°, para os monitores Victoreen 190 I , Graetz GPD 100 e MIR 7026.

Para a análise dos dados foram levados em consideração os requisitos estabelecidos na Norma IEC 60846 (2001), que em termos de dependência energética, apresenta os limites mostrados na Tabela 35.

Tabela 35: limites estipulados para dependência energética pela IEC 60846 (2001)

Faixa de energia	Percentual de variação aceitável
30 a 200 keV	±35%
200 a 1500 keV	±15%

Neste trabalho, a análise dos dados na faixa de baixa energia será efetuada entre 48 e 200 keV uma vez que a maioria dos equipamentos foi projetada para leituras a partir de 48 keV. Somente os monitores Inovision e Victoreen 190I, segundo o fabricante (Tabela 8) foram projetados para medidas a partir de 25 keV.

A análise dos dados mostra que há uma forte dependência da resposta dos monitores para feixes de radiação com energias menores que 83 keV. Entretanto, todos os monitores, com exceção do Victoreen 190I, apresentaram uma melhora no percentual de variação da sua dependência energética quando usados em termos de H*(10) do que em termos de kerma no ar, na faixa de 48 keV a 83 keV, conforme mostra a Tabela 36.

Tabela 36: Percentual de variação da resposta dos monitores na faixa de 48 keV a 83 keV em temos de H*(10) e kerma no ar.

MONITOR	H*(10)	KERMA NO AR
GRAETZ X5DEx	38,2%	60,4%
INOVISION 451P	14,7%	26,9%
DOSIMETER 3009A	93%	133%
LUDLUM 3	65,1%	100%
MIR 7026	8,3%	24%
GRAETZ GPD 100	27,6%	45,2%
VICTOREEN 190I	11,6%	9,56%

A Tabela 37 mostra a variação da dependência energética dos monitores com base nos intervalos

Tabela 37: Percentuais de variação da resposta dos monitores, em função da energia, em termos de H*(10)

	ENERGIA	
MONITOR	48-200 keV	200-1250 keV
Dosimeter 3009A	21%	30%
Graetz X5DEx	42%	70%
Inovision 451P	25,3%	25%
Ludlum 3/44-38	30%	20%
MIR 7026	11%	13%
Graetz GPD 100	22%	32%
Victoreen 190I	40%	24%

Observa-se, pelos dados, que os monitores Graetz X5DEx e Victoreen 190I estudados apresentaram percentuais de variação acima dos limites estipulados pela Norma em todo o intervalo de energia analisado não estando adequados para medições em H*(10).

Os monitores Dosimeter 3009A, Inovision 451P, Ludlum modelo 3 com sonda 44-38 e o Graetz GPD 100 apresentaram variações aceitáveis, segundo a Norma, apenas para o intervalo de energia entre 48 keV e 200 keV, não estando aptos para medidas em H*(10) para intervalos acima de 200 keV.

A análise destes dados mostra também que somente o monitor MIR 7026 apresenta os percentuais de variação em concordância com o estabelecido pela IEC 60846, em toda faixa de energia citada pela Norma.

É importante ressaltar que este monitor possui no seu interior um filtro de chumbo com acrílico que deve estar compensando a dependência energética da sua resposta.

Uma comparação com os dados apresentados por Grecco et al (GRECCO, 2001), apresentado na Figura 8, mostra que a resposta em termos de H*(10) em função da energia da radiação, apresentava um pico na região entre 100 e 200 keV, o que não foi observado nos nossos resultados. A variação de resposta do monitor em termos de H*(10) na faixa de 65 keV com relação ao Cs-137 foi de 300% no trabalho de Grecco et al. As diferenças observadas nas respostas obtidas nos dois trabalhos devem-se ao fato de que o Grecco fez os testes do monitor sem os filtros de chumbo e acrílico que envolvem o detector Geiger-Muller.

4.3 DEPENDÊNCIA ANGULAR

Com relação à variação da resposta dos monitores em estudo, em função do ângulo de incidência da radiação, as Tabelas 38 a 44 mostram os valores das indicações dos monitores para feixes de raios-X de 83 keV (N-100) e de ^{60}Co e ^{137}Cs.

Os dados apresentados referem-se às leituras obtidas para ângulos de incidência entre -90° e +90° em relação à incidência normal (ângulo de 0°). As tabelas também mostram a normalização das leituras obtidas com relação ao valor obtido com o ângulo de 0°.

Tabela 38: Resposta do monitor de radiação **Dosimeter 3009 A** em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90°a +90°.

N-100			
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	220,0	376,2	0,51
-45	221,0	377,9	0,51
0	434,5	743,0	1,00
45	220,8	377,5	0,51
90	263,2	450,0	0,60
Cs-137			
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	350,0	420,0	0,80
-45	401,2	481,4	0,92
0	438,0	525,6	1,00
45	403,0	483,6	0,92
90	383,3	460,0	0,86
Co-60			
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	415,0	481,4	0,74
-45	520,0	603,2	0,93
0	560,6	650,3	1,00
45	525,6	609,7	0,94
90	455,5	528,4	0,81

Tabela 39: Resposta do monitor de radiação **Graetz X5DEx** em função de H*(10), para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°.

		N-100	
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	500,0	855,0	1,19
-45	460,0	786,6	1,09
0	420,4	718,9	1,00
45	462,6	791,1	1,10
90	558,4	954,9	1,33
		Cs-137	
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	38,0	45,6	0,69
-45	51,9	62,3	0,94
0	55,1	66,1	1,00
45	52,5	63,0	0,95
90	40,1	48,1	0,73
		Co-60	
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	57,0	66,1	0,77
-45	70,0	81,2	0,94
0	74,3	86,2	1,00
45	71,9	83,4	0,97
90	61,0	70,8	0,82

Tabela 40: Resposta do monitor de radiação **Inovision 451 P** em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos -90°a +90°.

		N-100	
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	270,0	461,7	0,96
-45	290,0	495,9	1,03
0	280,3	479,3	1,00
45	289,1	494,5	1,03
90	291,0	497,5	1,04
		Cs-137	
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	40,5	48,6	1,12
-45	41,0	49,2	1,14
0	36,0	43,2	1,00
45	40,8	49,0	1,13
90	39,4	47,3	1,09
		Co-60	
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	40,0	46,4	1,05
-45	39,8	46,2	1,05
0	38,0	44,1	1,00
45	39,7	46,1	1,05
90	39,4	45,7	1,04

Tabela 41: Resposta do monitor de radiação **Ludlum modelo 3 sonda 44-38** em função de H*(10) para feixes 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°.

	N-100		
ÂNGULO	Indicação (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	400,0	684,0	0,73
-45	450,0	769,5	0,82
0	550,0	940,5	1,00
45	440,0	752,4	0,80
90	300,0	513,0	0,55
	Cs-137		
ÂNGULO	Indicação (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	21,0	25,2	0,84
-45	25,0	30,0	1,00
0	25,0	30,0	1,00
45	25,0	30,0	1,00
90	17,2	20,6	0,69
	Co-60		
ÂNGULO	Indicação (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	25,0	29,0	0,87
-45	28,9	33,5	1,00
0	28,8	33,4	1,00
45	29,2	33,9	1,01
90	21,2	24,6	0,74

Tabela 42: Resposta do monitor de radiação **MIR 7026** em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°.

	N-100		
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	310,0	530,1	0,57
-45	428,0	731,9	0,79
0	545,2	932,3	1,00
45	432,0	738,7	0,79
90	259,8	444,3	0,48
	Cs-137		
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	40,0	48,0	0,79
-45	43,3	52,0	0,86
0	50,6	60,7	1,00
45	44,3	53,2	0,88
90	36,0	43,2	0,71
	Co-60		
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	48,0	55,68	0,85
-45	50,0	58,0	0,89
0	56,4	65,5	1,00
45	51,0	59,2	0,90
90	55,2	64,0	0,98

Tabela 43: Resposta do monitor de radiação **Graetz GPD 100** em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90° a +90°.

N-100			
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	390,0	666,9	0,83
-45	408,0	697,7	0,85
0	482,6	825,2	1,00
45	412,0	704,5	0,85
90	434,8	743,5	0,90
Cs-137			
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	41,5	49,8	0,71
-45	54,0	64,8	0,93
0	58,3	70,0	1,00
45	55,9	67,1	0,96
90	48,3	57,9	0,83
Co-60			
ÂNGULO	Indicação do instrumento (μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	47,0	54,5	0,71
-45	64,0	74,2	0,96
0	66,3	77,0	1,00
45	65,2	75,6	0,98
90	52,3	60,7	0,79

Tabela 44: Resposta do monitor de radiação **Victoreen 190 I** em função de H*(10) para feixes de 83 keV e feixes de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co, para ângulos de -90°a +90°.

Cs-137			
ÂNGULO	Taxa dose (indicação μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	35,0	42,0	0,88
-45	38,5	46,2	0,96
0	40,0	48,0	1,00
45	38,1	45,7	0,95
90	32,1	38,5	0,80
Co-60			
ÂNGULO	Taxa dose (indicação μSv/h)	Taxa H*(10) (μSv/h)	normalização
-90	40,0	46,4	0,80
-45	43,0	49,9	0,86
0	49,8	57,8	1,00
45	43,1	50,0	0,86
90	36,6	42,4	0,73

Os gráficos polares obtidos a partir destes dados estão apresentados nas Figuras 22 e 23

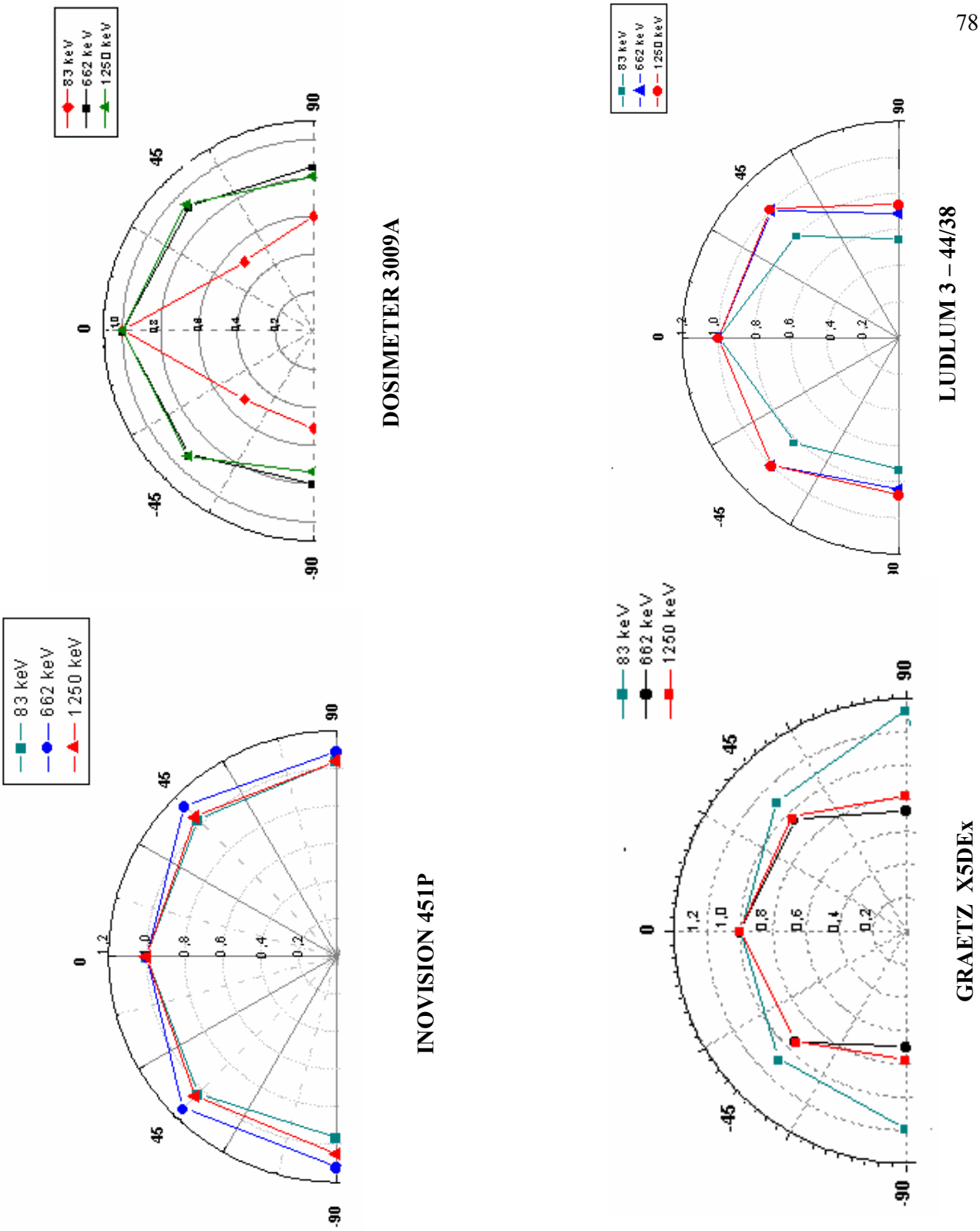
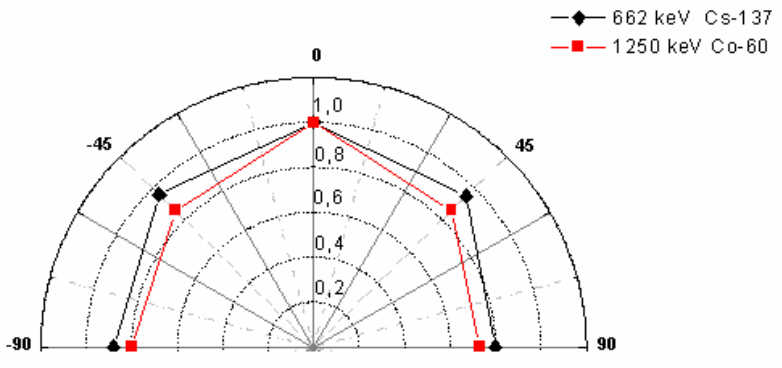
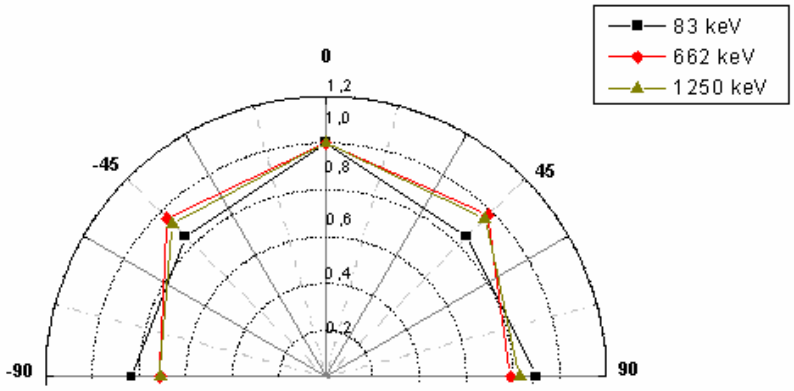


Figura 22: Variação da resposta angular dos monitores Dosimeter 3009 A, Ludlum 3, Inovision 451P e Graetz X5Dex, em H*(10), para feixe de R-X 83 keV e feixes gama ^{137}Cs e ^{60}Co.

VICTOREEN 190I



GRAETZ GPD 100



MIR 7026

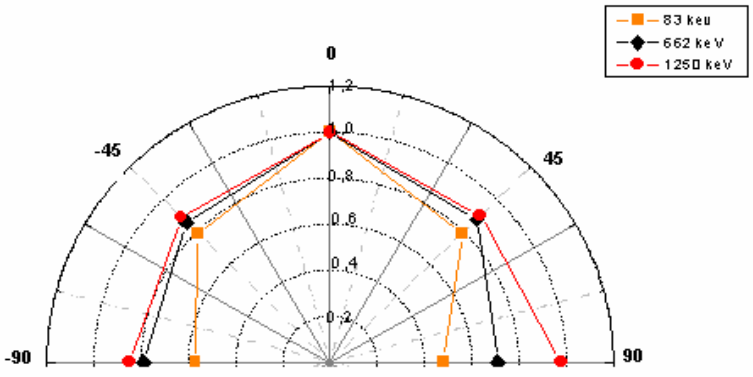


Figura 23: Variação da resposta angular dos monitores Victoreen 190I para ^{137}Cs e ^{60}Co , Graetz GPD 100 e MIR 7026, em H*(10), para feixe de R-X 83 keV e feixes gama ^{137}Cs e ^{60}Co.

Segundo as recomendações da IEC 60846 (2001) a dependência angular da resposta dos monitores de área pode ter uma variação de ±25% para ângulos de incidência da radiação entre 0° e +90° e de ±50% para ângulos entre 0° e 180°, como mostra a Tabela 45.

Na Tabela 45 estão apresentados os valores dos limites de aceitação para a dependência angular de monitores em H*(10) segundo a Norma IEC 60846 (2001).

Tabela 45: Limites de aceitação para a dependência angular segundo a IEC 60846 (2001)

Faixa de ângulo	**Percentual de variação aceitável**
0° a 90°	±25%
0° a 180°	±50%

Neste sentido, observa-se a partir dos dados apresentados na Tabela 46 que os monitores Graetz modelo GPD 100 e Inovision modelo 451P atendem às exigências na IEC 60846 (IEC, 2001) para dependência angular para as três energias avaliadas. Os demais equipamentos, com exceção do Ludlum modelo 3 com sonda 44-38, atendem às exigências na Norma com relação às radiações do ^{137}Cs e do ^{60}Co. Os monitores MIR 7026 atende às exigências da Norma apenas para o ^{60}Co e o Victoreen 190I apenas para o ^{137}Cs.

No caso do aparelho Victoreen 190I não foram efetuadas medidas com feixes de raios-X de 83 keV devido à problemas operacionais com o aparelho de raios-X durante o período de coleta de dados.

A análise destes dados mostrou que estudos mais detalhados devem ser efetuados de modo a adequar o projeto de fabricação dos monitores, a fim de que estes possam ser utilizados para medidas em termos de H*(10).

Tabela 46: Variação percentual da dependência angular dos monitores estudados para feixes de incidência qualidade ISO N-100 e feixes de ^{137}Cs e ^{60}Co.

	ANGULOS DE 0° a +90°		
MONITOR	N-100 (83 keV)	^{137}Cs	^{60}Co
Dosimeter 3009A	-40%	-14%	-19%
Graetz X5DEx	+33%	-27%	-18%
Inovision 451P	+4%	+4%	+9%
Ludlum 3/44-38	-45%	-26%	-31%
MIR 7026	-52%	-29%	-2%
Graetz GPD 100	-10%	-17%	-21%
Victoreen 190I	-	-20%	-27%

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitem concluir:

1. Para a implantação da grandeza equivalente de dose ambiental, H*(10), há necessidade de caracterização da resposta dos monitores nesta grandeza. A simples utilização de fatores de conversão não garante a adequação da resposta do monitor.
2. O cálculo de incertezas tipos A e B é necessário para a avaliação final das respostas dos monitores em H*(10), uma vez que os métodos experimentais de medidas, a reprodutibilidade associada às leituras dos equipamentos e a energia utilizada para estas medidas introduzem uma contribuição significativa de erro.
3. Dentre os monitores avaliados nenhum monitor atendeu totalmente aos critérios da IEC 60846 (IEC, 2001) com relação à dependência energética e angular.
4. Para a faixa de baixa energia (entre 48 e 200 keV), os monitores Dosimeter 3009A, Inovision 451P, Ludlum 3/44-38, MIR 7026 e Graetz GPD 100 apresentam dependências energéticas com variações inferiores a ±35%.
5. Para a faixa de energia entre 200 e 1250 keV, somente o monitor MIR 7026 apresentou uma dependência energética de sua resposta que atende às exigências da IEC 60846.
6. Todos os monitores avaliados, com exceção do Graetz GPD 100 e do Inovision 451P, apresentaram uma grande dependência angular com variações nas respostas maiores que ±25% para ângulos de incidência entre 0° e +90° e feixes de 83 keV.
7. Para feixes de radiação gama do ^{60}Co todos os monitores com exceção do Ludlum 3 e do Victoreen 190I tiveram sua dependência angular aceitável, com variações inferiores a ±25% para ângulos entre 0° e 90°.

Desta forma, fica clara a necessidade da realização de estudos para a adequação dos equipamentos e para a divulgação das novas grandezas junto aos usuários antes dos órgãos nacionais implementarem a obrigatoriedade do uso do H*(10).

Por outro lado, é importante que os fabricantes forneçam todos os dados técnicos dos monitores de radiação, uma vez que durante este trabalho, verificou-se que em muitos manuais técnicos, informações importantes como o percentual de variação da resposta do instrumento com a energia e com o ângulo da radiação não são divulgados, de forma tal que não permitem ao usuário a adequada avaliação do funcionamento do instrumento.

De modo geral, a implementação das novas grandezas operacionais não será trivial, irão requerer esforços conjuntos entre laboratórios de ensaios, fabricantes, laboratórios de calibração e usuários, pois se por um lado, a maioria dos instrumentos em uso no país são projetados para a grandeza exposição, de outro, existe a necessidade de uma preparação dos usuários destes instrumentos para a utilização do H*(10).

Assim, através deste trabalho, verificamos que só através da avaliação da resposta dos monitores fundamentada em normas, é que se pode detectar as limitações do instrumento para H*(10) e a partir daí se estudar a melhor forma de adequação para a nova grandeza, seja através da confecção de filtros compensadores para energia, seja através da revisão do seu projeto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTS, W.G.; AMBROSE, P.; BÖHNM, J.; DIETZE, G.;. **New dose quantities in radiation protection.** Physikalische Technische Bundesanstalt Dosimetrie (PTB-Dos-23e) Braunschweig, 1995.

CNEN-NE-3.01; **Diretrizes Básicas de Radioproteção**. Resolução N° 27. Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Janeiro, 2005.

GRECCO, C.H.S.; ESTRADA, J.J.S.; RAMOS M.M. O.; OBADIA I. J. **Monitor de radiação para medidas de H*(10)**. In: VI Congresso Brasileiro de Física Médica, 4-6 de outubro 2001, Rio de Janeiro.

ICRP 1977. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 26. Oxford, England: Pergamon Press, 1977.

ICRP 1991. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** ICRP Publication 60, Annals of ICRP 21, n. 1-3, 1991.

ICRU 1985 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). Report 39; **Determination of Dose Equivalents Resulting From External Radiations Sources.** Bethesda, 1985.

ICRU 1988 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). **Determination of Dose Equivalents from External Radiation /sources – part 2**. Report 43. December, 1988, Bethesda, Maryland, U.S.A.

ICRU 1992 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). **Measurement of Dose Equivalents Resulting from External Photon and Electron Radiations**. Report 47. Abril, 1992. Bethesda, Maryland, U.S.A.

ICRU 1993 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). **Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry**. Report 51. September, 1993, Bethesda, Maryland, U.S.A.

IAEA 2000- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments**. SAFETY REPORTS SERIES No. 16. VIENNA, 2000

IEC 60846 1999 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **Radiation Protection Instrumentation – Ambient and/or Directional Dose Equivalent**

(rate) Meters and/or Monitors for Beta, X and Gamma Radiation. Revision of IEC 60846, 1999.

IEC 60846 2001 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **Radiation Protection Instrumentation – Ambient and/or Directional Dose Equivalent (rate) Meters and/or Monitors for Beta, X and Gamma Radiation.** Final Draft of IEC 60846, 2001.

IPEN - REGIONAL Course on the Establishment of a Programme for Occupational Monitoring. Instrumentos y tecnicas de monitoraje de radiación externa en locales de trabajo. IPEN-CNEN-SP, 1992.

ISO 4037-1 1996 - 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 1996

ISO 4037-3 1997 - 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.** Final Draft International Standard ISO 4037-3, 1997.

ISO GUM 1995- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.** Geneva, 1995.

NCRP 1993 – National Council on Radiation Protection. **Limitation of exposure to ionizing radiations**. – Report 116. Washington, DC, 1993.

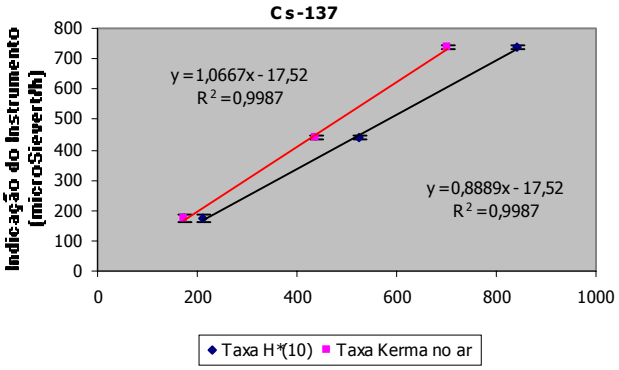
RAMOS, M.M.O. **O que muda na monitoração de área com a introdução das grandezas operacionais do ICRU para radiação de fótons?**. Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes IRD/CNEN, 1994.

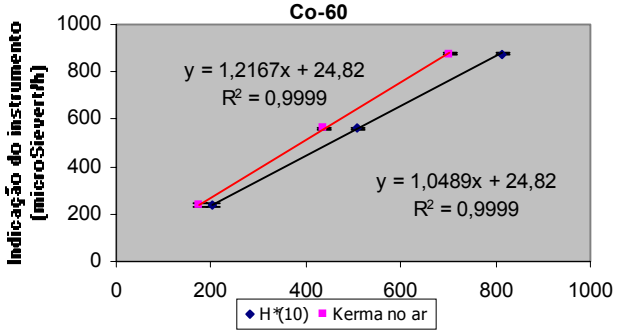
SABOL, J.; WENG, P.S. **Introduction to Radiation Protection Dosimetry.** Singapore, Editora World Scientific, 1995.

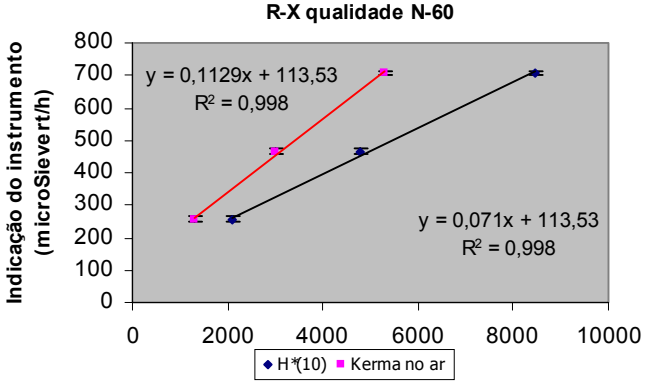
THOMPSON, I.M.G**.** The adoption of the new ICRU dose equivalent operational quantities within the Central Electricity Generating Board of the United Kingdom. **Radiation Protection Dosimetry**. v. 28, n. 1, p. 149-155, 1989.

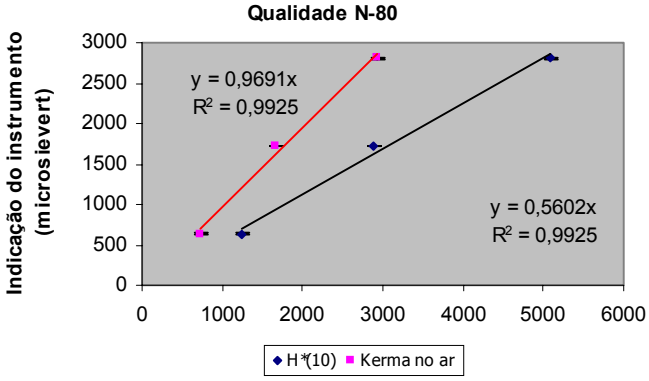
WAGNER,S.R., GROSSWENDT, B., HARVEY, J.R., MILL, A.J.,SELBACH, H.J. and SIEBERT, B.R.L. Unified Conversion Functions for the new ICRU Operational Radiation Protection Quantities**. Radiation Protection Dosimetry.** V.12, p. 231-235, 1985.

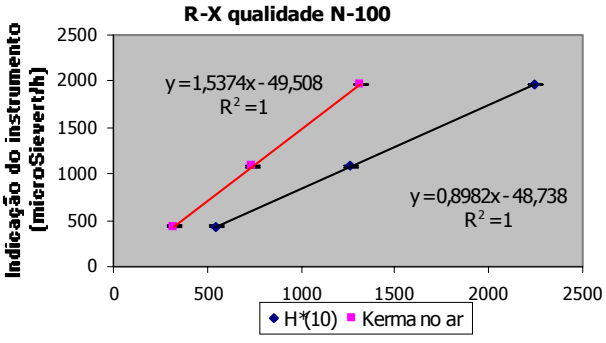
APÊNDICE A – Curvas de calibração do monitor Dosimeter 3009A em termos de Kar e H*(10) para diferentes energias

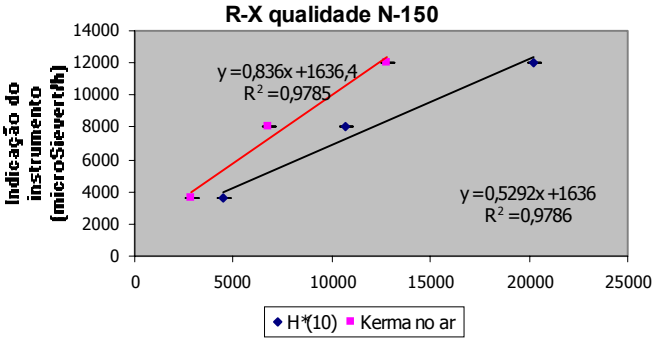




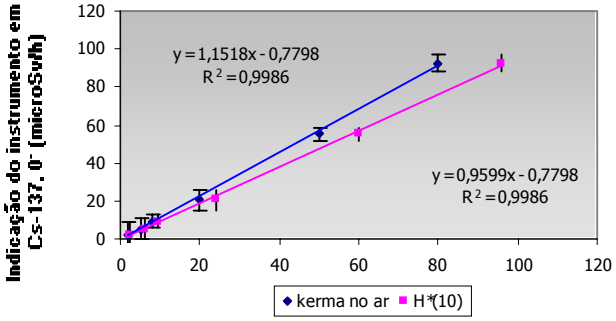


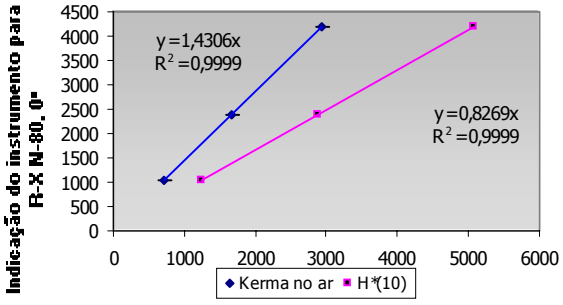


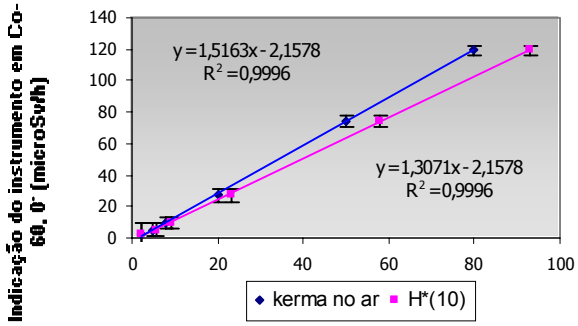


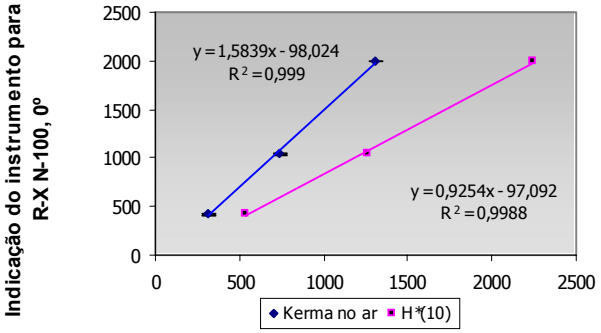


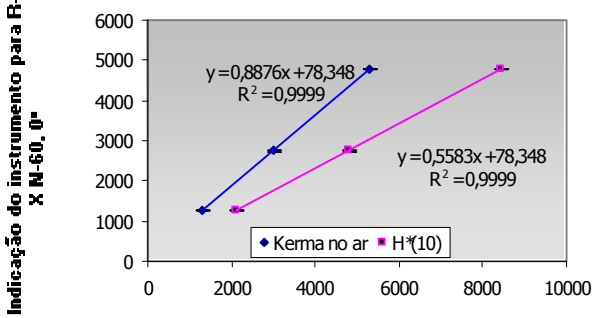
APÊNDICE B – Curvas de calibração do monitor **Graetz X5DEx** em termos de K_{ar} e H*(10)para diferentes energias

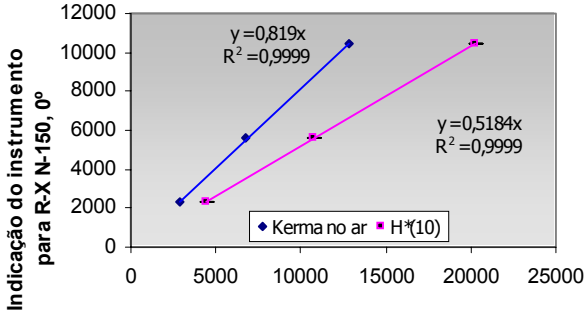




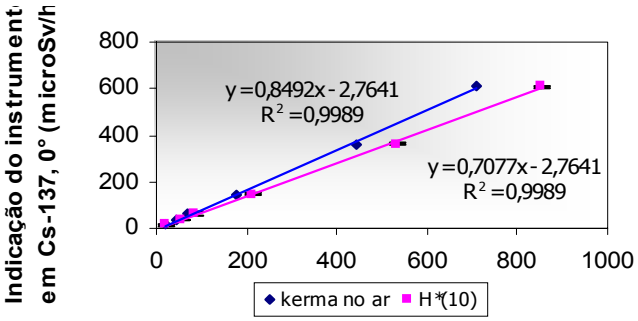


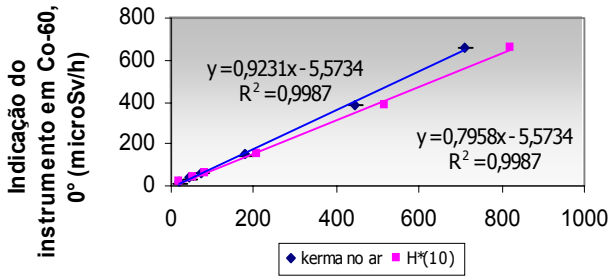


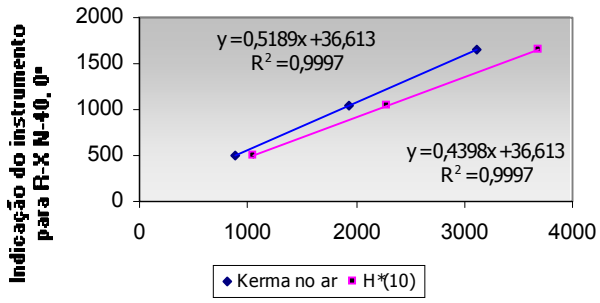


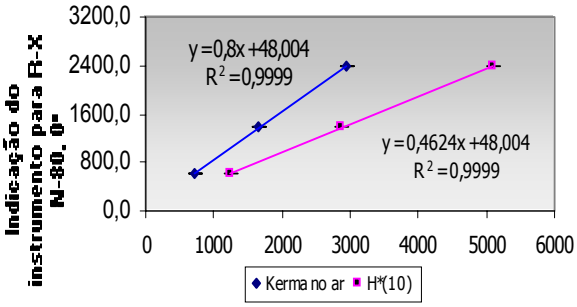


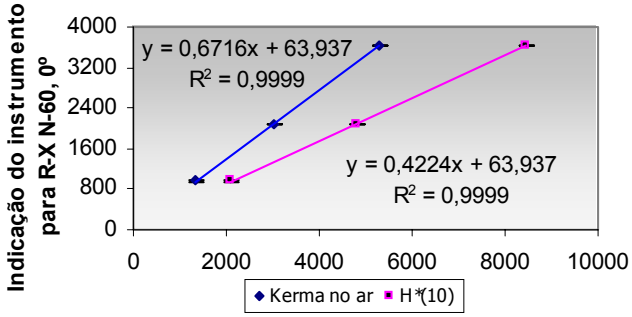
APÊNDICE C – Curvas de calibração do monitor **Inovision** 451P em termos de Kar e H*(10) para diferentes energias

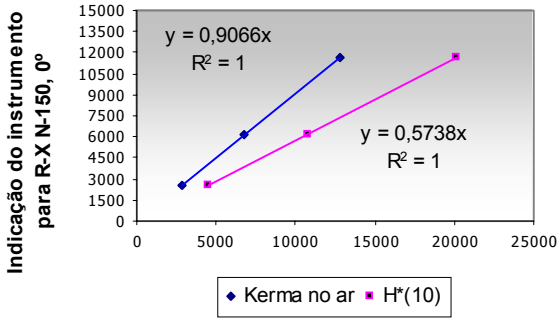


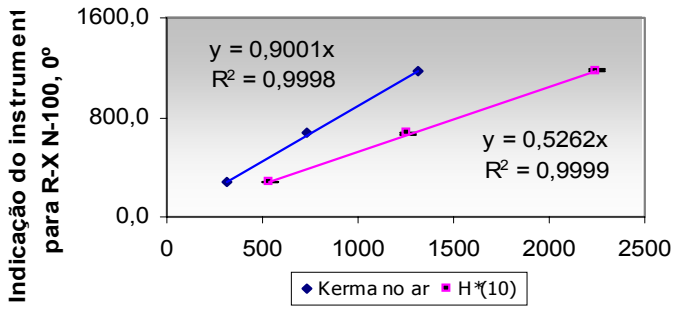




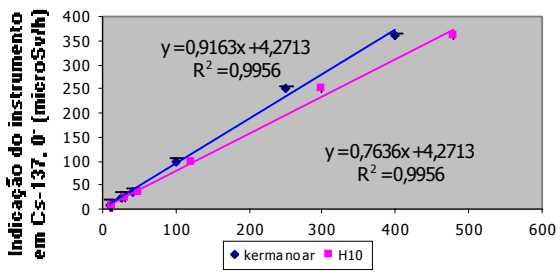


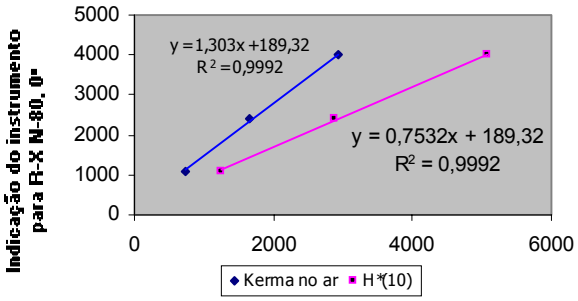


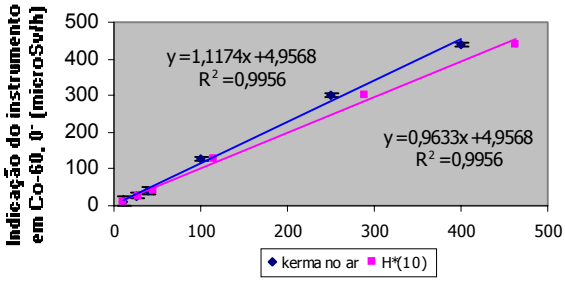


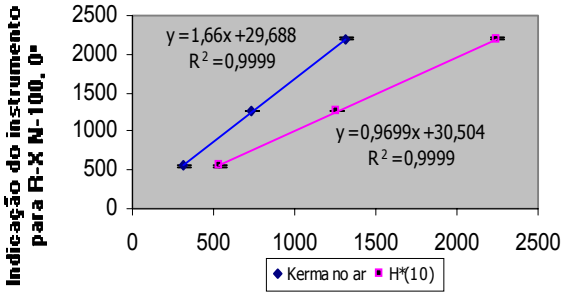


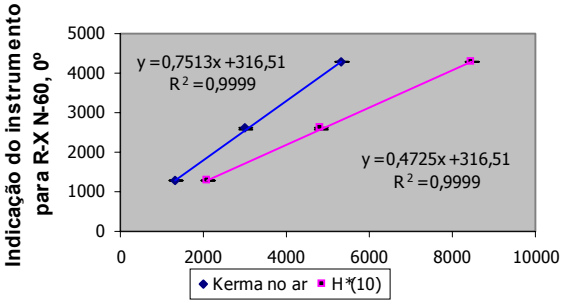
APÊNDICE D – Curvas de calibração do monitor **Ludlum modelo 3 com** sonda 44-38 em termos de Kar e H*(10) para diferentes energias

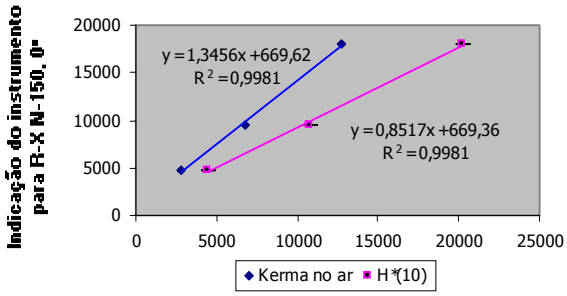




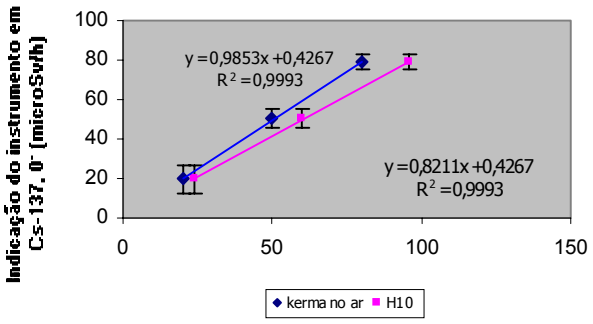


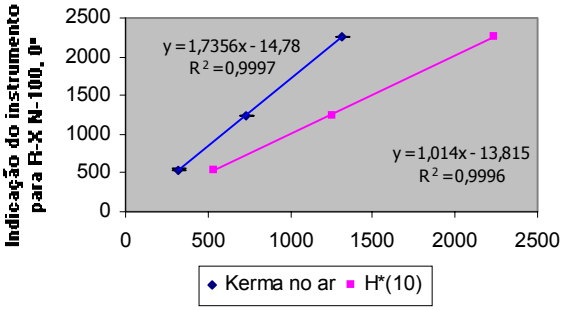


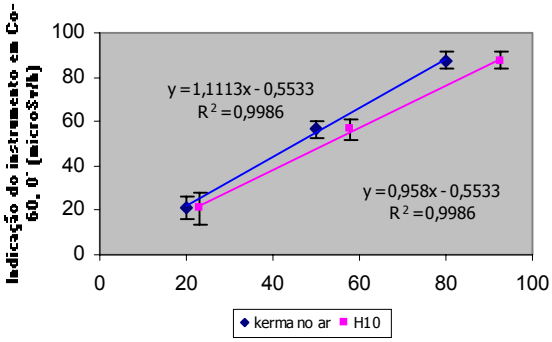


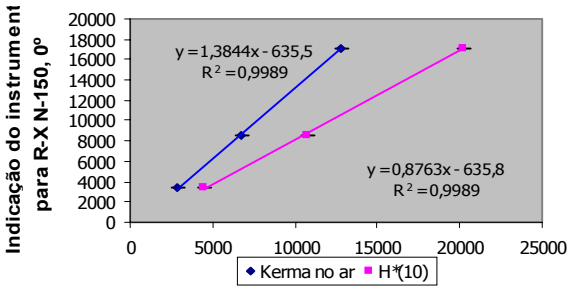


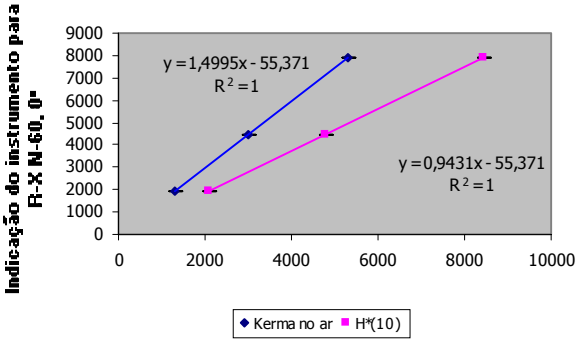
APÊNDICE E – Curvas de calibração do monitor **IEN CNEN** Brasil modelo MIR 7026 em termos de Kar e H*(10) para diferentes energias



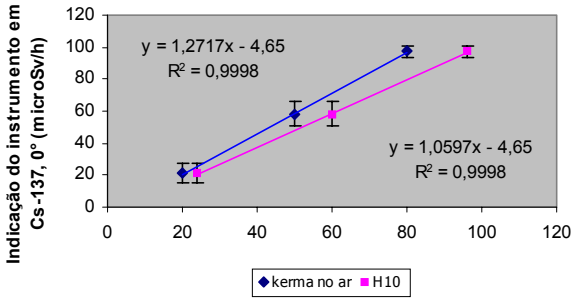


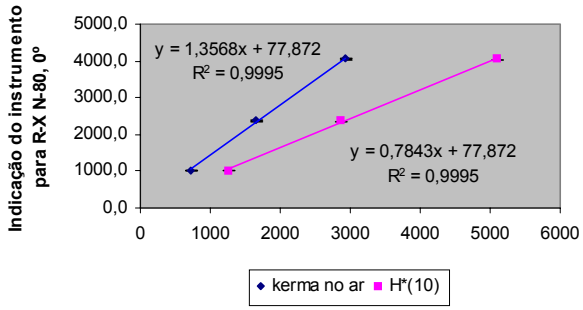


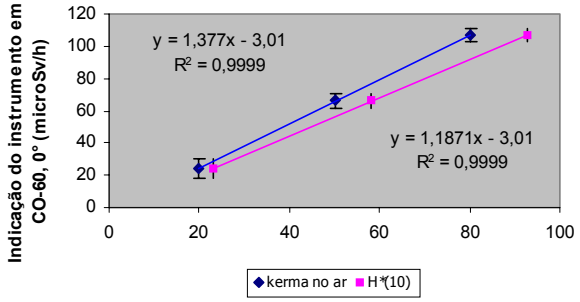


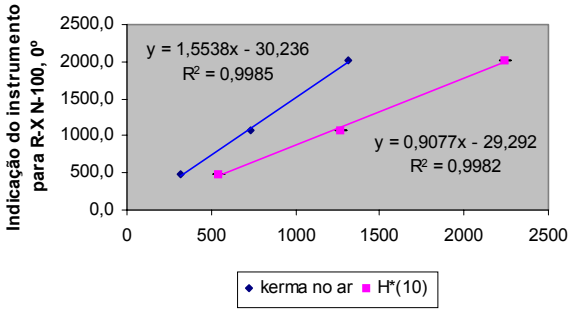


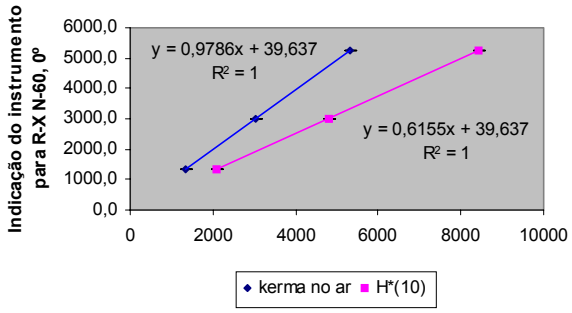
APÊNDICE F – Curvas de calibração do monitor **Graetz GPD 100** em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias

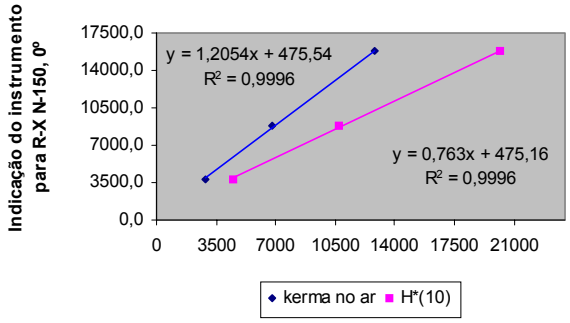
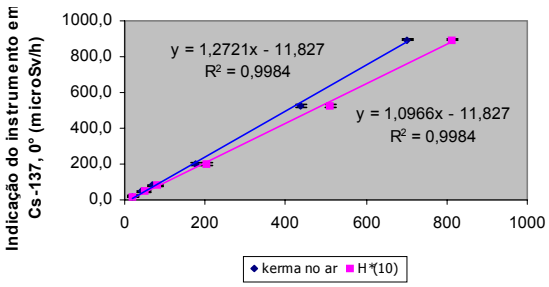
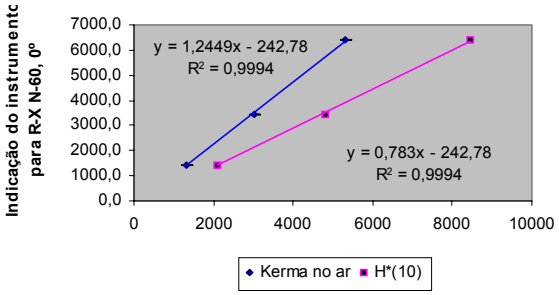
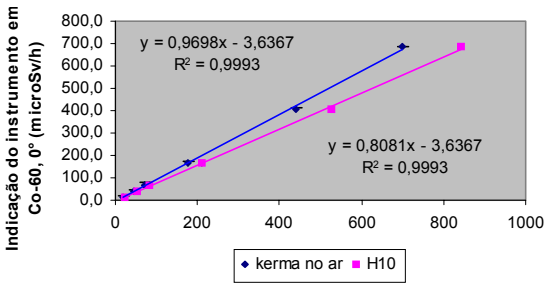
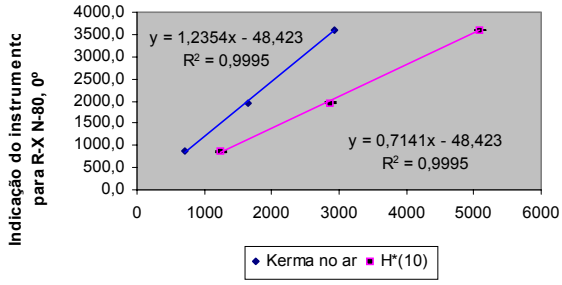
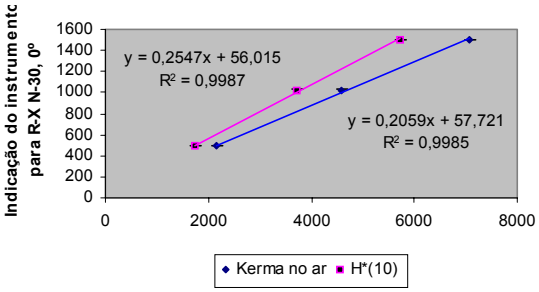
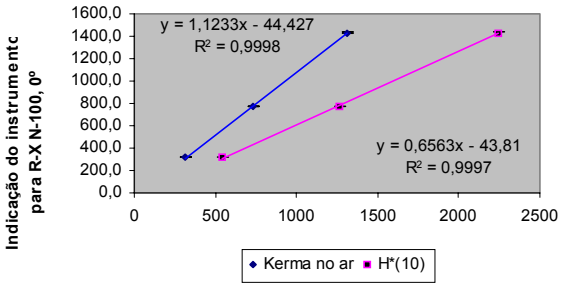
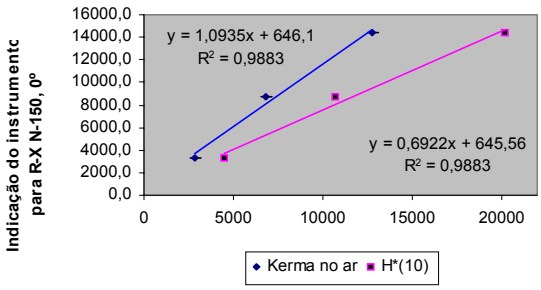












APÊNDICE G – Curvas de calibração do monitor Victoreen 190I em termos de K_{ar} e H*(10) para diferentes energias