

**MINISTÉRIO DA DEFESA**  
**EXÉRCITO BRASILEIRO**  
**SECRETARIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**  
*(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho - 1792)*



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO  
PARA A GRANDEZA EQUIVALENTE  
DE DOSE AMBIENTE, H\* (10)**

***CLÁUDIO HENRIQUE DOS SANTOS GRECCO***

**IME**

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
SECRETARIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

**CLÁUDIO HENRIQUE DOS SANTOS GRECCO**

**RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA A  
GRANDEZA EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE,  $H^*(10)$**

T  
0492  
GREC

**Rio de Janeiro**

**2001**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**CLÁUDIO HENRIQUE DOS SANTOS GRECCO**

**RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA A GRANDEZA  
EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE,  $H^*(10)$**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Prof. Julio José da Silva Estrada - D.C.  
Prof. Domingos D'Oliveira Cardoso - D.C.

Rio de Janeiro  
2001

c2001

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Grecco, Cláudio Henrique dos Santos.

Resposta de monitores de radiação para a grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$  / Cláudio Henrique dos Santos Grecco. -- Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2001.

xiv, 162 p. : il., graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2001.

1. Monitores de radiação. 2. Equivalente de dose ambiente. 3. Ensaios de desempenho I. Instituto Militar de Engenharia. II. Título.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**CLÁUDIO HENRIQUE DOS SANTOS GRECCO**

**RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA A GRANDEZA  
EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE, H\*(10)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Prof. Julio José da Silva Estrada – D.C.

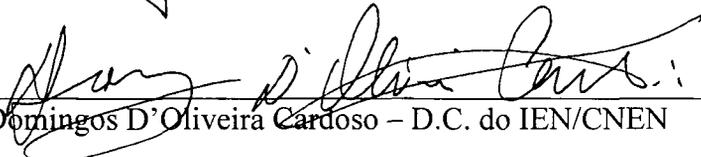
Prof. Domingos D'Oliveira Cardoso – D.C.

Aprovada em 10 de dezembro de 2001 pela seguinte Banca Examinadora:



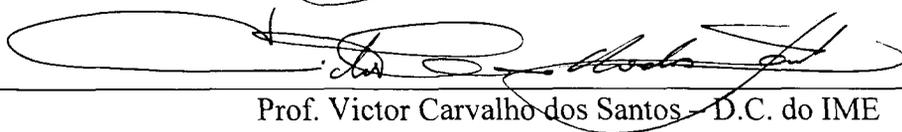
---

Prof. Julio José da Silva Estrada – D.C. do IME - Presidente



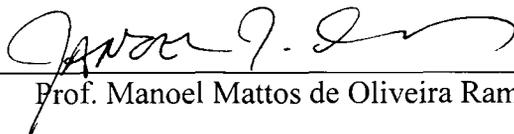
---

Prof. Domingos D'Oliveira Cardoso – D.C. do IEN/CNEN



---

Prof. Victor Carvalho dos Santos – D.C. do IME



---

Prof. Manoel Mattos de Oliveira Ramos – M.C. do IRD/CNEN



---

Prof. Isaac José Obadia – M.C. do IEN/CNEN

Rio de Janeiro

2001

## AGRADECIMENTOS

Aos meus professores orientadores, Dr. Julio José da Silva Estrada e Dr. Domingos D'Oliveira Cardoso, pela amizade, apoio e orientação.

Ao Dr. Rex Nazaré Alves que me possibilitou esta oportunidade de ampliar meus horizontes.

Ao M.C. Manoel Mattos de Oliveira Ramos pela amizade, orientação e ajuda indispensável na realização deste trabalho.

Ao M.C. Isaac José Obadia pelo apoio, sugestões e críticas no decorrer deste trabalho.

Ao M.C. Mauro Vítor de Oliveira pela colaboração na parte computacional.

Ao M.C. José Carlos Soares de Almeida pelo estímulo e pelo cuidadoso trabalho de revisão do texto.

Ao M.C. Carlos Borges da Silva pela ajuda na formatação do texto.

À equipe do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, do IRD, pelo apoio e interesse dispensados no decorrer deste trabalho.

Ao pessoal da oficina mecânica do Departamento de Instrumentação e Confiabilidade Humana, do IEN, pela confecção dos filtros de compensação utilizados neste trabalho.

Ao Instituto Militar de Engenharia e ao Instituto de Engenharia Nuclear, alicerces da minha formação e aperfeiçoamento.

À minha esposa e às minhas filhas pela compreensão e força nas horas mais difíceis.

À minha mãe pelo incentivo no decorrer deste trabalho.

Enfim, a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para o êxito deste trabalho.

“Ninguém é tão grande que não possa aprender,  
nem tão pequeno que não possa ensinar”.

VOLTAIRE

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	16
LISTA DE SIGLAS.....	17
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 Histórico.....	20
1.2 Objetivo do Trabalho.....	22
1.3 Importância.....	23
1.4 Organização do Trabalho.....	23
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>25</b>
2.1 Grandezas e Unidades Radiológicas de Uso Geral.....	26
2.2 Grandezas e Unidades para Uso em Proteção Radiológica.....	26
2.2.1 Grandezas de Proteção.....	27
2.2.2 Grandezas Operacionais.....	31
2.2.2.1 Grandezas Operacionais para Monitoração de Área.....	34
2.2.2.2 Grandeza Operacional para Monitoração Pessoal.....	36
2.3 Radiações de Referência Produzidas por Fótons.....	37
2.3.1 Características e Métodos de Produção.....	37
2.3.2 Fundamentos de Calibração Relacionados com as Grandezas Básicas que Caracterizam o Campo de Radiação.....	40
2.3.3 Calibração e Determinação da Resposta de Instrumentos de Proteção Radiológica.....	40
2.4 Características Gerais de Instrumentos de Monitoração de Área para a Grandeza $H^*(10)$ .....	41
2.5 Características do Detector Geiger-Müller para a Grandeza $H^*(10)$ .....	42
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>

3.1	Materiais Utilizados.....	44
3.1.1	Monitor Inteligente de Radiação Modelo 7026.....	44
3.1.1.1	Características de Operação.....	45
3.1.1.2	Especificações Radiológicas, Elétricas e Mecânicas.....	46
3.1.1.3	Descrição em Blocos.....	49
3.1.2	Gerador de Raios X Siemens Modelo Stabilipan 300.....	53
3.1.2.1	Mesa de Controle.....	53
3.1.2.2	Gerador de Alta Tensão.....	53
3.1.2.3	Tubo de Raios X.....	54
3.1.2.4	Roda de Filtros.....	54
3.1.2.5	Câmara Monitora.....	55
3.1.2.6	Colimador.....	55
3.1.3	Fontes Radioativas Utilizadas.....	57
3.2	Metodologia e Procedimentos.....	59
3.2.1	Metodologia para Determinação da Resposta de Monitores de Radiação para $H^*(10)$ .....	59
3.2.2	Procedimento para Determinação da Resposta Energética.....	61
3.2.2.1	Procedimento para Determinação da Resposta Energética para Radiações X Filtradas.....	61
3.2.2.2	Procedimento para Determinação da Resposta Energética para Radiações Gama.....	65
3.2.3	Procedimento para Determinação da Resposta Angular.....	67
3.3	Incertezas Associadas às Medições.....	69
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
4.1	Dosimetria no Equipamento de Raios X.....	70
4.2	Resposta Energética do Monitor MIR 7026 com o Detector GM Interno sem o Filtro de Compensação.....	71
4.3	Resposta Energética do Monitor MIR 7026 com Detector GM Interno com Filtros de Compensação.....	74
4.4	Resposta Angular do Monitor MIR 7026 com Detector GM Interno com Filtro de Compensação de Latão e Chumbo com Furos Concêntricos (20 % de Área Vazada).....	83
4.5	Cálculos das Incertezas Associadas às Medições.....	87

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	90
5.1	CONCLUSÕES.....	90
5.2	SUGESTÕES.....	91
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	93
<b>7</b>	<b>APÊNDICES</b> .....	96
7.1	APÊNDICE 1: Planilha de Dados da Dosimetria Realizada no Equipamento de Raios X para Calibração da Câmara Monitora Mod. 7816 Utilizando como Padrão a Câmara de Ionização Mod. M32002.....	97
7.2	APÊNDICE 2: Planilha de Dados das Medições para Obtenção da Resposta Energética do Monitor MIR 7026, com o Detector GM interno sem Filtro de Compensação.....	100
7.3	APÊNDICE 3: Listagem do Programa Utilizado para o Cálculo do Filtro de Compensação do Detector GM do Monitor MIR 7026.....	104
7.4	APÊNDICE 4: Resultado da Simulação dos Filtros Escolhidos para serem Utilizados no Detector GM do Monitor MIR 7026.....	109
7.5	APÊNDICE 5: Planilha de Dados das Medições para Obtenção da Resposta Energética do Monitor MIR 7026, com o Detector GM interno com Filtro de Compensação de Alumínio e Chumbo com Furos Concêntricos.....	110
7.6	APÊNDICE 6: Planilha de Dados das Medições para Obtenção da Resposta Energética do Monitor MIR 7026, com o Detector GM interno com Filtro de Compensação de Alumínio e Chumbo com Espaço Central .....	114
7.7	APÊNDICE 7: Planilha de Dados das Medições para Obtenção da Resposta Energética do Monitor MIR 7026, com o Detector GM interno com Filtro de Compensação de Latão e Chumbo com Furos Concêntricos.....	118
7.8	APÊNDICE 8: Planilha de Dados das Medições para Obtenção da Resposta Energética do Monitor MIR 7026, com o Detector GM interno com Filtro de Compensação de Latão e Chumbo com Furos Espaço Central.....	122
7.9	APÊNDICE 7: Planilha de Dados das Medições para Obtenção da Resposta Angular do Monitor MIR 7026, com o Detector GM interno com Filtro de Compensação de Latão e Chumbo com Furos Concêntricos.....	126

<b>8</b>	<b>ANEXOS</b> .....	147
8.1	ANEXO 1.....	148
8.2	ANEXO 2.....	156
	<b>GLOSSÁRIO</b> .....	161

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1 Esquema representativo de: (a) um campo de radiação real com a fluência em um ponto $P$ ; (b) um campo de radiação expandido no ponto $P$ , com a <i>esfera ICRU</i> centrada para ilustrar o tamanho do campo; (c) um campo de radiação alinhado e expandido no ponto $P$ .....	33
FIG. 2.2 Geometria de irradiação da <i>esfera ICRU</i> e o ponto $P$ na esfera, no qual o equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$ , é determinado em um campo de radiação expandido e alinhado.....	35
FIG. 2.3 Geometria de irradiação da <i>esfera ICRU</i> e o ponto $P$ na esfera, no qual o equivalente de dose direcional, $H'(d, \Omega)$ , é determinado em um campo de radiação expandido, com a direção $\Omega$ de interesse.....	35
FIG. 2.4 Equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$ , por unidade de exposição, $X$ , em função da energia do fóton.....	41
FIG. 3.1 Monitor Inteligente de Radiação MIR Modelo 7026.....	45
FIG. 3.2 Resposta angular para o $^{137}\text{Cs}$ e o $^{241}\text{Am}$ do MIR 7026.....	47
FIG. 3.3 Diagrama em blocos do MIR 7026.....	51
FIG. 3.4 Diagrama em blocos das sondas (interna e externas) do MIR 7026.....	52
FIG. 3.5 Diagrama em blocos simplificado do gerador de raios X da Siemens, modelo Stabilipan 300.....	55
FIG. 3.6 Fotografia da mesa de controle do gerador de raios X Stabilipan 300.....	56
FIG. 3.7 Fotografia do gerador de raios X Stabilipan 300.....	56

FIG. 3.8 Fotografia do sistema de calibração que mostra a blindagem, sinalizada pela seta, onde estão armazenadas as fontes radioativas.....	58
FIG. 4.1 Resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno sem o filtro de compensação.....	73
FIG. 4.2 Detector GM LND 713 que é utilizado no Monitor MIR 7026.....	75
FIG. 4.3 <b>(1)</b> Filtro de alumínio e chumbo com furos concêntricos (21 % de área vazada); <b>(2)</b> Filtro de alumínio e chumbo com espaço central (21 % de área vazada); <b>(3)</b> Filtro de latão e chumbo com furos concêntricos (20 % de área vazada); <b>(4)</b> Filtro de latão e chumbo com espaço central (20 % de área vazada).....	75
FIG. 4.4 Resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com o filtro de compensação de alumínio e chumbo com furos concêntricos.....	79
FIG. 4.5 Resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com o filtro de compensação de alumínio e chumbo com espaço central.....	80
FIG. 4.6 Resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com o filtro de compensação de latão e chumbo com furos concêntricos.....	81
FIG. 4.7 Resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com o filtro de compensação de latão e chumbo com espaço central.....	82
FIG. 4.8 Resposta angular do MIR 7026, normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ a $0^\circ$ , referente ao plano horizontal.....	86

FIG. 4.9 Resposta angular do MIR 7026, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$  a  $0^\circ$ , referente ao plano vertical.....86

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 Relação Q-L, na água, definida na publicação ICRP 60 (1991).....	27
TAB. 2.2 Fatores de peso $w_T$ para órgãos e tecidos .....	30
TAB. 2.3 Fatores de peso $w_R$ para diferentes tipos de radiação.....	30
TAB. 2.4 Resumo das grandezas operacionais.....	36
TAB. 2.5 Qualidades de radiação para radiações de referência produzidas por fótons.....	39
TAB. 3.1 Resposta energética normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ .....	47
TAB. 3.2 Medidas efetuadas.....	48
TAB. 3.3 Apresentação da leitura no mostrador.....	48
TAB. 3.4 Fatores de correção, $Kq$ , para cada qualidade da radiação, fornecido pelo certificado de calibração da câmara padrão.....	64
TAB. 3.5 Coeficientes de conversão, $h^*k$ , de <i>kerma</i> no ar, $K_{ar}$ , para equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$ , para radiação X filtrada, a uma distância de referência de 2,0 m.....	64
TAB. 3.6 Coeficientes de conversão, $h^*k$ , de <i>kerma</i> no ar, $K_{ar}$ , para equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$ , para radiação gama.....	66
TAB 4.1 Fatores de calibração da câmara de ionização mod. M32002 (Fcp) e da câmara monitora mod. 7816 (Fcm).....	71
TAB. 4.2 Valores da taxa verdadeira convencional de $K_{ar}$ e $H^*(10)$ .....	72

TAB. 4.3 Valores de resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno sem o filtro de compensação.....	73
TAB. 4.4 Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e $H^*(10)$ e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de alumínio e chumbo com furos concêntricos.....	76
TAB. 4.5 Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e $H^*(10)$ e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de alumínio e chumbo com espaço central.....	76
TAB. 4.6 Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e $H^*(10)$ e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de latão e chumbo com furos concêntricos.....	77
TAB. 4.7 Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e $H^*(10)$ e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de latão e chumbo com espaço central.....	77
TAB. 4.8 Valores de resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de alumínio e chumbo com furos concêntricos.....	79
TAB. 4.9 Valores de resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de alumínio e chumbo com espaço central.....	80
TAB. 4.10 Valores de resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de latão e chumbo com furos concêntricos.....	81

TAB. 4.11 Valores de resposta energética para $H^*(10)$ , normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de latão e chumbo com espaço central.....	82
TAB. 4.12 Valores de resposta angular do MIR 7026, normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ a $0^\circ$ , referente ao plano horizontal para a energia de 83 keV (1) e para a energia de 208 keV (2).....	84
TAB. 4.13 Valores de resposta angular do MIR 7026, normalizada para o $^{137}\text{Cs}$ a $0^\circ$ , do referente ao plano vertical para a energia de 83 keV (1) e para a energia de 208 keV (2).....	85
TAB. 4.14 Planilha para cálculo das incertezas combinada e expandida.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$^{137}\text{Cs}$  - Radionuclídeo Césio-137

$^{60}\text{Co}$  - Radionuclídeo Cobalto-60

$H^*(10)$  - Equivalente de dose ambiente produzido na esfera ICRU na profundidade de 10 mm.

$K_{ar}$  - Grandeza dosimétrica kerma no ar

$h^*k$  - Coeficiente de conversão de  $K_{ar}$  para  $H^*(10)$

cps - Contagem por segundo

## LISTA DE SIGLAS

IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
ICRP	Comissão Internacional em Proteção Radiológica
ICRU	Comissão Internacional em Unidades e Medidas da Radiação
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear – RJ
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria – RJ
ISO	Organização Internacional de Normalização
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes do IRD

## RESUMO

Monitores de radiação são equipamentos utilizados no mundo inteiro para avaliar se um determinado local com presença de radiação ionizante apresenta condições seguras para as pessoas que freqüentam este local. Os monitores de radiação devem ser ensaiados segundo normas internacionais ou nacionais com vistas a qualificá-los para uso.

Este trabalho descreve uma metodologia e procedimentos para avaliar as respostas energética e angular de qualquer monitor de radiação para a grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , segundo recomendações de normas ISO e IEC. A metodologia e os procedimentos foram aplicados no Monitor Inteligente de Radiação modelo MIR 7026, desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), para avaliar e adequar sua resposta para  $H^*(10)$ , qualificando-o como um medidor do valor da grandeza equivalente de dose ambiente.

Os ensaios foram executados no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), e os resultados obtidos mostraram que o Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026 pode ser utilizado como um medidor de  $H^*(10)$ , atendendo assim aos requisitos da norma IEC 60846. A incerteza expandida encontrada na determinação das respostas energética e angular do MIR 7026, em todas as qualidades de radiação utilizadas neste trabalho, foi de 4,5 % a um nível de confiança de 95 %.

## ABSTRACT

Radiation monitors are used all over the world to evaluate if places with presence of ionising radiation present safe conditions for people. Radiation monitors should be tested according to international or national standards in order to be qualified for use.

This work describes a methodology and procedures to evaluate the energy and angular responses of any radiation monitor for ambient dose equivalent,  $H^*(10)$ , according to the recommendations of ISO and IEC standards. The methodology and the procedures were applied to the Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026, developed by the Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), to evaluate and to adjust its response for  $H^*(10)$ , characterizing it as an ambient dose equivalent meter.

The tests were performed at the Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), at Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), and results showed that the Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026 can be used as an  $H^*(10)$  meter, in accordance to the IEC 60846 standard requirements. The overall estimated uncertainty for the determination of the MIR 7026 response, in all radiation qualities used in this work, was 4,5 % to a 95 % confidence limit.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 HISTÓRICO

Nos primórdios da energia nuclear no país, quando o seu uso estava restrito a algumas aplicações em centros de pesquisa e hospitais, disseminou-se uma preocupação específica com os aspectos de higiene ocupacional e segurança dos trabalhadores vinculados a tais atividades.

Com o crescimento da utilização da radiação ionizante, devido ao aumento das instalações nucleares e médicas, enormes benefícios têm sido obtidos para a população, mas em contrapartida, este crescimento vem contribuindo significativamente para o aumento da exposição dos trabalhadores e da população. Dentro deste panorama, podemos citar a radiologia diagnóstica que é considerada a principal fonte de radiação ionizante utilizada pelo homem. Pelo menos um quarto da população mundial fez algum tipo de exame radiológico desnecessário (MATTSSON & ALMÉN, 1995). Assim, qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas e produzir um benefício líquido para a sociedade.

Os efeitos da radiação nocivos à saúde dependem diretamente da energia absorvida pelo corpo ou tecido. Determinar a energia absorvida é a base da radioproteção, isto porque, existe uma relação direta entre o detrimento radiológico e a energia absorvida pelo corpo. Desta forma, quando um indivíduo é exposto a radiação ionizante, é necessário expressar o grau de irradiação em termos numéricos. Isso é uma exigência da proteção radiológica e é claramente demonstrado pelos limites autorizados e regulatórios.

A *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) é um organismo internacional, fundado em 1928 com o objetivo de promover o desenvolvimento da radioproteção para o benefício público e fornecer recomendações em todos os seus aspectos. Dentre essas recomendações, está o estabelecimento de um sistema de especificações numéricas baseadas na dose equivalente em vários órgãos de um indivíduo e na soma ponderada da dose em alguns órgãos, resultando em uma dose efetiva (ICRP 60, 1991). Essas grandezas limitantes ou de proteção que indicam o risco à saúde humana devido à radiação

ionizante, apresentam a desvantagem de não serem mensuráveis. Por outro lado, em termos de metrologia, era preciso estabelecer uma referência para servir de padrão para definição das grandezas e contornar as diferenças de tamanho e forma do físico dos indivíduos expostos à radiação.

A *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) é um outro organismo internacional, fundado em 1925 com o objetivo principal de desenvolver recomendações internacionalmente aceitas a respeito das grandezas e unidades de radiação e radioatividade. A ICRU em sua publicação 39 (ICRU 39, 1985) recomenda uma esfera de material equivalente ao tecido, de 30 cm de diâmetro como um receptor aceitável para estimativa dessas novas grandezas limitantes. Nessa mesma publicação, a ICRU, para atender as práticas de proteção radiológica, desenvolveu uma base conceitual para definição e medição de grandezas operacionais para monitoração de área e individual. Essas grandezas são usadas em medições e cálculos para avaliação da concordância com as grandezas limitantes.

As grandezas de calibração primária não são grandezas equivalentes de dose. O *kerma* no ar é definido pelos laboratórios de padronização como a grandeza primária para calibração. Essa grandeza é selecionada porque não se modifica ao longo do tempo e também por ser fácil de ser medida. As relações entre as grandezas limitantes, as grandezas operacionais e as grandezas primárias são expressas por coeficientes de conversão obtidos para cada situação de medição.

As grandezas operacionais servem de guia aos organismos de metrologia das radiações ionizantes. Nesse contexto, a monitoração de área para fótons terá que se adequar às novas grandezas.

A grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , é a grandeza operacional recomendada para monitoração do ambiente de trabalho com radiação. Esta nova grandeza é usada em medidas preventivas ou antecipatórias, por meio da monitoração de área ou ambiental.

Assim, os monitores de radiação X e gama que eram projetados e calibrados para medir exposição terão que ser modificados e calibrados para medir o valor da grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ . Neste trabalho, a expressão simplificada “equivalente de dose”, refere-se ao valor da grandeza equivalente de dose.

Essa mudança poderá ser feita gradativamente, avaliando a resposta em função da energia para as novas grandezas dos monitores de radiação desenvolvidos para exposição, a fim de determinar suas limitações e futuras modificações no projeto (RAMOS, 2000b).

· Alguns trabalhos foram publicados com resultados da avaliação da resposta em função da energia (resposta energética) para as novas grandezas de monitores desenvolvidos para exposição (BURGESS, 1985) (RAMOS, 1994). Diversos monitores já foram desenvolvidos para  $H^*(10)$ , mas nenhum com tecnologia nacional.

O Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), órgão da CNEN, desenvolve com tecnologia nacional, instrumentação e sistemas para uso em reatores, medicina nuclear e radioproteção. Entre esses produtos está o Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026, utilizado para monitoração de área e para medida de contaminação superficial. Este monitor apresenta todas as vantagens da tecnologia digital e atende a qualquer aplicação na área de proteção radiológica, tendo sido desenvolvido, testado e calibrado para medir exposição. As calibrações são realizadas pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), órgão da CNEN, que dispõe de um Laboratório de Dosimetria Padrão Secundário, que em 1989 foi designado Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI).

Este trabalho apresenta uma metodologia e procedimentos de ensaios radiológicos para a avaliação da resposta, em função da energia (resposta energética) e do ângulo de incidência da radiação (resposta angular), de instrumentos que medem equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ . Esta metodologia e os procedimentos de ensaio, que são necessários para qualificar um monitor de radiação para uso, foram baseados nas recomendações das normas da *International Organization for Standardization* (ISO 4037-1, 1996) (ISO 4037-2, 1997) (ISO 4037-3, 1997) e da *International Electrotechnical Commission* (IEC 60846, 1999).

A metodologia e os procedimentos são aplicados no Monitor MIR 7026 para avaliação de sua resposta para a grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ . Os dados obtidos são analisados e comparados com os requisitos fornecidos pela norma IEC 60846, para adequar a sua resposta e qualificá-lo como um monitor de radiação para medidas de  $H^*(10)$ .

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo definir e elaborar uma metodologia e procedimentos de ensaios radiológicos para a avaliação da resposta energética e angular de monitores de radiação para a grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ . A metodologia e os procedimentos aplicados ao Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026, possibilitarão uma

avaliação e adequação de sua resposta para a nova grandeza operacional, de acordo com a norma IEC 60846.

A metodologia, os procedimentos e os arranjos experimentais elaborados neste trabalho, têm como referências documentos normativos fornecidos por organismos internacionais (ISO e IEC) que especificam as características gerais, as funções, as características de desempenho e os métodos de teste, padrões e limites de aceitação de medidas em medidores de equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ .

### 1.3 IMPORTÂNCIA

As novas grandezas estão sendo aceitas e implantadas em todo o mundo e serão, em um futuro próximo, utilizadas em todas as práticas de radioproteção. Sendo assim, a principal motivação para realização deste trabalho é qualificar o Monitor Inteligente de Radiação MIR7026 com seu detector interno, segundo normas internacionais, como o primeiro instrumento desenvolvido com tecnologia nacional para medidas de equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , atendendo a usuários de todo o país.

Este trabalho apresenta uma metodologia e procedimentos que podem ser utilizados em qualquer monitor de radiação para a determinação da resposta energética e angular para a grandeza  $H^*(10)$ . Desta forma, além de contribuir para a literatura científica referente ao assunto, auxiliará profissionais no desenvolvimento e na calibração de monitores de radiação para a nova grandeza operacional.

Os resultados obtidos neste trabalho, com um nível de confiança de 95 %, mostraram que o Monitor Inteligente de Radiação pode ser utilizado como um medidor de  $H^*(10)$ , atendendo assim aos requisitos da norma IEC 60846.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nos capítulos que se seguem serão abordados alguns aspectos considerados importantes para a compreensão do trabalho.

O capítulo 2 apresenta as grandezas e unidades radiológicas de uso geral, a evolução conceitual das grandezas para uso em radioproteção e suas relações, além de uma descrição das radiações de referência utilizadas em proteção radiológica para a calibração de monitores de radiação e alguns aspectos importantes para a compreensão do tema da dissertação.

O capítulo 3 apresenta a descrição da metodologia e dos procedimentos elaborados e adotados na realização do trabalho experimental, além dos materiais utilizados na realização dos ensaios.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e o cálculo das incertezas associadas às medições.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para melhorar a resposta angular do Monitor de Radiação MIR 7026 e para trabalhos futuros.

Os dados experimentais necessários para a determinação da resposta energética, da resposta angular e das incertezas associadas, são apresentados nos APÊNDICES 1, 2, 5, 6, 7, 8 e 9.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A radiação ionizante apresenta grande risco à saúde humana, mas os danos provocados pela radiação somente foram reconhecidos muito depois de Röntgen ter descoberto a radiação X e de Becquerel o fenômeno da radioatividade. A reação de um indivíduo à exposição de radiação depende de diversos fatores como (TAUHATA et al, 1999):

- Quantidade total de radiação recebida;
- Quantidade total de radiação recebida anteriormente pelo organismo, sem recuperação;
- Textura orgânica individual;
- Dano físico recebido simultaneamente com a dose de radiação (queimadura, por exemplo);
- Intervalo de tempo durante o qual a quantidade total de radiação foi recebida.

Os efeitos radioinduzidos podem receber denominações em função do valor da dose e forma de resposta, em função do tempo de manifestação e do nível orgânico atingido. Assim, em função da dose e forma de resposta, são classificados em estocásticos e determinísticos; em termos do tempo de manifestação, em imediatos e tardios; em função do nível do dano, em somáticos e genéticos. Os efeitos estocásticos são aqueles em que a probabilidade de ocorrência é proporcional à dose de radiação recebida. Entre estes efeitos, destaca-se o câncer. Os efeitos determinísticos são aqueles em que a intensidade do dano aumenta com a dose, a partir de um limiar. Entre estes efeitos estão a catarata, os efeitos não malignos na pele e a redução de fertilidade. Os efeitos imediatos são os primeiros efeitos biológicos causados pela irradiação. Estes efeitos ocorrem num período de poucas horas até algumas semanas após a exposição, como por exemplo, a radiodermite. Os efeitos tardios são os efeitos biológicos que aparecem depois de anos ou mesmo décadas, como por exemplo o câncer (TAUHATA et al, 1999). Os efeitos somáticos surgem do dano nas células do corpo e aparecem na própria pessoa irradiada. Dependem da dose absorvida, da taxa de absorção da energia da radiação, da região e área do corpo irradiada. Os efeitos genéticos são efeitos que surgem no descendente da pessoa irradiada como resultado do dano produzido pela irradiação em células dos órgãos reprodutores, as gônadas.

Uma das questões iniciais na utilização da radiação ionizante é como realizar uma medição de valores de grandezas utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria.

Um dos objetivos principais da *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) é divulgar internacionalmente recomendações aceitáveis para as grandezas e unidades de radiação e radioatividade no campo da dosimetria, incluindo a Proteção Radiológica. Para estabelecer essas recomendações, a ICRU tem trabalhado em conjunto com a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP).

## 2.1 GRANDEZAS E UNIDADES RADIOLÓGICAS DE USO GERAL

A *International Commission on Radiation Units and Measurements*, em sua publicação ICRU 33 (1980), considera as grandezas de uso geral divididas em quatro grandes grupos: grandezas radiométricas, coeficientes de interação, grandezas dosimétricas e grandezas de radioatividade. Essas grandezas são descritas no ANEXO 1.

## 2.2 GRANDEZAS E UNIDADES PARA USO EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

As grandezas de proteção ou limitantes e as grandezas operacionais são as grandezas definidas para serem utilizadas em proteção radiológica.

As publicações ICRP 26 (1977) e ICRP 60 (1991) foram as duas grandes referências em relação ao estabelecimento de grandezas radiológicas, suas relações e métodos de medição, dentro de uma concepção mais coerente possível. Na publicação ICRP 60 (1991), novas recomendações foram estabelecidas, dentre elas a aplicação de novas grandezas para uso em proteção radiológica.

As grandezas de proteção ou limitantes (ICRP 26, 1977), criadas para indicar o risco humano da exposição à radiação ionizante, foram introduzidas na legislação brasileira pela CNEN (CNEN NE 3.01, 1988). Essas grandezas não são diretamente mensuráveis, mas podem, por meio de cálculos, ser relacionadas ao campo de radiação no qual ocorre a

exposição. As três principais grandezas de proteção são: a dose absorvida média em um órgão ou tecido,  $D_T$ , a dose equivalente em um órgão ou tecido,  $H_T$ , e a dose efetiva,  $E$ .

Para estabelecer uma ligação entre as grandezas de proteção e o campo de radiação, a ICRU desenvolveu grandezas operacionais para medida da exposição à radiação externa. Essas novas grandezas são utilizadas em radioproteção nas práticas de monitoração de área e monitoração individual. A existência destas grandezas deve-se ao fato de que as grandezas limitantes não são mensuráveis ou facilmente estimáveis. As grandezas operacionais foram primeiro definidas na publicação ICRU 39 (1985) e ligeiramente modificadas nas publicações ICRU 43 (1988), ICRU 47 (1992) e ICRU 51 (1993) para atender uma necessidade da publicação ICRP 26 (1977) ao medir o equivalente de dose efetivo,  $H_E$ . Atualmente as grandezas operacionais são denominadas: equivalente de dose ambiente,  $H^*(d)$ , equivalente de dose direcional,  $H'(d, \Omega)$ , e equivalente de dose pessoal,  $H_p(d)$ .

## 2.2.1 GRANDEZAS DE PROTEÇÃO

Para propósitos de proteção radiológica foi introduzido o fator de qualidade de radiação  $Q$ . O fator de qualidade  $Q$  é adimensional e constitui um fator de peso proveniente da simplificação dos valores da  $RBE$  (Eficiência Biológica Relativa) dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico. O valor de  $Q$  obtido em função da transferência linear de energia,  $L$ , e sua dependência com  $L$ , na água é apresentada na TAB. 2.1 (ICRP 60, 1991).

**TAB. 2.1** Relação Q-L, na água, definida na publicação ICRP 60 (1991).

Transferência linear de energia, $L$ , na água, em keV/ $\mu\text{m}$	$Q(L)$
< 10	1
10 – 100	$0,32L - 2,2$
> 100	$300/\sqrt{L}$

O fator de qualidade  $Q$  pondera a dose absorvida pela eficiência biológica das partículas carregadas que estão produzindo tal dose. Essa grandeza ponderada foi denominada de *equivalente de dose*,  $H$ , que é definida (ICRU 40, 1986) pelo produto da dose absorvida,  $D$ , e o fator de qualidade,  $Q$ , em um ponto do tecido,

$$H = D.Q \quad (\text{EQ 2.1})$$

a unidade no SI é o  $\text{J kg}^{-1}$ , que recebe o nome especial de sievert (Sv).

Podem ser citadas as seguintes grandezas de proteção:

a) Equivalente de dose efetiva

A ICRP, em sua publicação 26 (1977), recomendou o equivalente de dose efetiva,  $H_E$ , como o valor da grandeza limitante para ser usado em dosimetria interna e mais tarde aplicado à dosimetria de irradiação externa ao corpo. O equivalente de dose efetivo é dado pela relação (ICRP 26, 1977):

$$H_E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (\text{EQ 2.2})$$

onde  $w_T$  é o fator de peso do tecido ou órgão  $T$  e  $H_T$  é o equivalente de dose no tecido ou órgão. Os valores de peso utilizados para  $w_T$ , que são independentes do tipo de energia de radiação incidente no corpo, são apresentados na TAB. 2.2.

O equivalente de dose efetiva tem como intenção expressar a exposição parcial do corpo em termos de seu equivalente de exposição de corpo todo.

Para aplicações práticas, as grandezas equivalente de dose ambiente e equivalente de dose direcional (grandezas operacionais) foram introduzidas pela ICRU, como grandezas mensuráveis relacionadas à grandeza equivalente de dose efetiva (ICRU 39, 1985).

b) Dose equivalente

Em 1991, a publicação ICRP 60 revisou as recomendações anteriores e introduziu duas novas grandezas em substituição à grandeza *equivalente de dose*,  $H$ , e à grandeza *equivalente*

de dose efetiva,  $H_E$ , chamadas dose equivalente no tecido ou órgão,  $H_T$  e dose efetiva,  $E$ .

Nas novas recomendações da ICRP 60 (1991), também foi introduzida a grandeza dose absorvida média,  $D_{T,R}$ , em um órgão ou tecido,  $T$ , devido a radiação  $R$ , incidente no corpo. A dose equivalente,  $H_T$ , de um órgão ou tecido,  $T$ , é então definida (ICRU 60, 1991) como uma soma ponderada de  $D_{T,R}$ , sobre as várias radiações  $R$ ,

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (\text{EQ 2.3})$$

onde  $w_R$  é o correspondente fator de peso da radiação. A unidade da dose equivalente no SI é  $\text{J kg}^{-1}$ , com o nome especial de sievert (Sv).

Os fatores de peso da radiação  $w_R$  foram selecionados pela ICRP para representar os valores da *RBE* (Eficiência Biológica Relativa) da radiação na indução de efeitos biológicos para baixas doses. Tais valores independem do tecido ou órgão irradiados.

Os valores de  $w_R$  específicos para cada tipo de radiação de acordo com a publicação 60 da ICRP são mostrados na TAB. 2.3. Esses valores são relacionados à radiação externa incidente sobre o corpo ou à radiação emitida por radionuclídeos depositados internamente no corpo.

**TAB. 2.2** Fatores de peso  $w_T$  para órgãos e tecidos.

<b>Tecido ou órgão <math>T</math></b>	<b>Fator de peso <math>w_T</math></b>
Gônadas	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Superfície óssea	0,01
Restante*	0,05

\* Cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, útero, pâncreas, vesícula, timo, glândulas adrenais e músculo.

**TAB. 2.3** Fatores de peso da radiação  $w_R$  para diferentes tipos de radiação.

<b>Tipo e energia da radiação</b>	<b>Fator de peso da radiação <math>w_R</math></b>
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e múons, todas as energias*	1
Nêutrons, energia: < 10 keV	5
de 10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Prótons, exceto os prótons de recuo, com energia > 2 MeV.	5
Partícula alfa, fragmentos de fissão e núcleos pesados.	20

\* Com exceção de elétrons Auger de átomos ligados ao DNA.

c) Dose efetiva

A dose efetiva,  $E$ , é a soma das doses equivalentes,  $H_T$ , em um tecido ou órgão, ponderada pelos fatores de peso do tecido,  $w_T$ ,

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (\text{EQ 2.4})$$

A unidade da dose efetiva no SI é  $\text{J kg}^{-1}$ , com o nome especial de sievert (Sv).

Para que uma dose equivalente uniforme em todo o corpo seja numericamente igual à dose efetiva, normaliza-se o somatório dos fatores de peso do tecido para o valor unitário.

A grandeza  $D_{T,R}$  que aparece nas definições da dose equivalente e dose efetiva não pode ser avaliada experimentalmente. Portanto, as equações correspondentes não podem ser usadas como base para medições. Para o propósito de medições, devem ser utilizadas as grandezas operacionais (RAMOS, 2000a).

## 2.2.2 GRANDEZAS OPERACIONAIS

Para a rotina de proteção radiológica é desejável que a exposição de indivíduos seja caracterizada e medida por uma única grandeza, pois facilita as avaliações, as comparações e o registro. É desejável, também, caracterizar a irradiação potencial de indivíduos em termos de uma simples grandeza de dose equivalente que exista em um fantoma aproximado ao corpo humano. O fantoma selecionado é chamado *esfera ICRU*. A *esfera ICRU* é uma esfera com diâmetro de 30 cm, feita com material equivalente ao tecido com densidade de  $1 \text{ g.cm}^{-3}$  e uma massa constituída de 76,2% de oxigênio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogênio e 2,6% de nitrogênio. Este material é chamado *tecido ICRU*. Esta esfera serve como um simulador do tronco humano, baseado no fato de que quase todos os órgãos sensíveis a radiação, poderiam ser nela englobados. Desta forma, todos os valores utilizados como referência para as grandezas radiológicas deveriam ter como *corpo de prova de medição*, a *esfera ICRU* (IAEA Safety Reports Series N°16, 2000).

. As grandezas operacionais são definidas em um ponto no tecido ou no fantoma em termos do fator de qualidade da radiação a ser aplicado à dose absorvida. Para tornar coerente a definição das grandezas operacionais, que precisavam ser aditivas e definidas num ponto de interesse, foi necessário caracterizar os campos de radiação, que são derivados do campo de radiação real. Os termos *expandido* e *alinhado* são usados para caracterizar esses campos derivados.

Um campo de radiação expandido é um campo de radiação homogêneo, no qual a *esfera ICRU* fica exposta, com a fluência, a distribuição de energia e a distribuição direcional iguais ao do ponto de referência *P* de um campo de radiação real.

No campo expandido e alinhado, a fluência e a distribuição de energia são idênticas a do campo expandido, mas a distribuição angular da fluência é unidirecional. Nesse campo, o valor do equivalente de dose em um ponto da *esfera ICRU* independe da distribuição direcional da radiação de um campo real. A FIG. 2.1 apresenta um campo de radiação expandido e alinhado.

Foi necessário, também, caracterizar a radiação incidente no corpo, dependendo de qual limite no corpo é relevante para tal radiação. Os termos *fortemente penetrante* e *fracamente penetrante* são usados para caracterizar tais radiações.

Se o equivalente de dose recebido por qualquer pequena área da camada sensível da pele é maior que 10 vezes comparada ao equivalente de dose efetiva, para uma dada orientação do corpo em um campo de radiação uniforme e unidirecional, a radiação é considerada *fracamente penetrante*. Porém, se for menor que 10 vezes, a radiação é dita *fortemente penetrante* (ICRU 39, 1985).

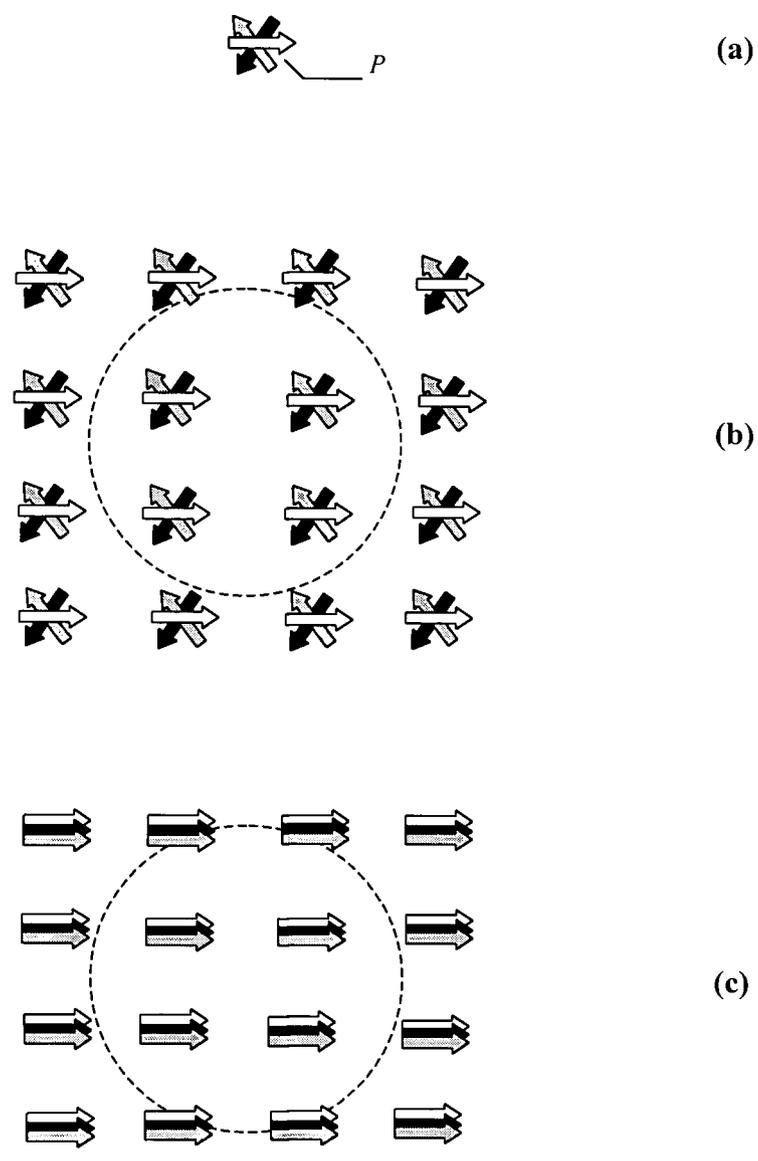


FIG. 2.1 Esquema representativo de: (a) um campo de radiação real com a fluência em um ponto  $P$ ; (b) um campo de radiação expandido no ponto  $P$ , com a *esfera ICRU* centrada para ilustrar o tamanho do campo; (c) um campo de radiação expandido e alinhado no ponto  $P$ .

### 2.2.2.1 GRANDEZAS OPERACIONAIS PARA MONITORAÇÃO DE ÁREA

As grandezas operacionais são mensuráveis, baseadas no valor da grandeza equivalente de dose no ponto do simulador, para irradiações com feixes externos. Duas grandezas relacionam a irradiação externa com a dose efetiva e o equivalente de dose no órgão ou tecido, para fins de monitoração de área. Essas grandezas são:

a) Equivalente de dose ambiente,  $H^*(d)$

O valor da grandeza equivalente de dose ambiente,  $H^*(d)$ , em um ponto no campo de radiação é o equivalente de dose que seria produzido pelo correspondente campo alinhado e expandido na *esfera ICRU* em uma profundidade  $d$ , no raio oposto à direção do campo alinhado. O valor para a profundidade  $d$  na *esfera ICRU* é 10 mm para radiação fortemente penetrante,  $H^*(10)$ , e 0,07 mm para radiação fracamente penetrante,  $H^*(0,07)$  (ICRU 39, 1985).

Qualquer afirmação do equivalente de dose ambiente deve incluir uma especificação da profundidade de referência,  $d$ , expressa em milímetros.

A FIG. 2.2 ilustra o procedimento de obtenção do equivalente de dose ambiente.

A unidade no SI é o  $J\ kg^{-1}$ , denominada de sievert (Sv).

b) Equivalente de dose direcional,  $H'(d,\Omega)$

O equivalente de dose direcional,  $H'(d,\Omega)$ , em um ponto no campo de radiação é o equivalente de dose que seria produzido pelo correspondente campo alinhado e expandido na *esfera ICRU* em uma profundidade,  $d$ , em um raio e uma direção especificada,  $\Omega$ . Para radiações fracamente penetrantes, é recomendado uma profundidade de 0,07 mm para a pele e de 3 mm para o cristalino. A notação utilizada tem a forma  $H'(0,07,\Omega)$  e  $H'(3,\Omega)$ , respectivamente. Para radiações fortemente penetrantes, a profundidade recomendada é de 10 mm, ou seja,  $H'(10,\Omega)$  (ICRU 39, 1985).

Qualquer afirmação do equivalente de dose direcional deve incluir uma especificação da profundidade de referência,  $d$ , e a direção  $\Omega$ . Para simplificar a notação, a profundidade  $d$  deve ser sempre expressa em milímetros.

A FIG.2.3 ilustra o procedimento de obtenção do equivalente de dose direcional.  
A unidade no SI é o  $\text{J kg}^{-1}$ , denominada de sievert (Sv).

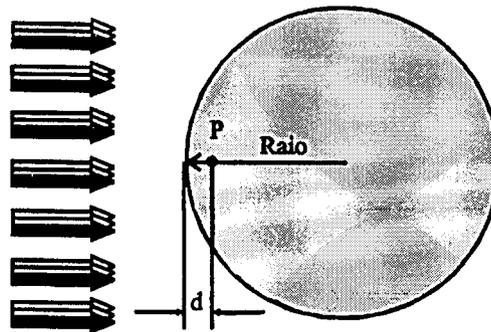


FIG. 2.2 Geometria de irradiação da *esfera ICRU* e o ponto *P* na esfera, no qual o equivalente de dose ambiente,  $H^*(d)$ , é determinado em um campo de radiação expandido e alinhado.

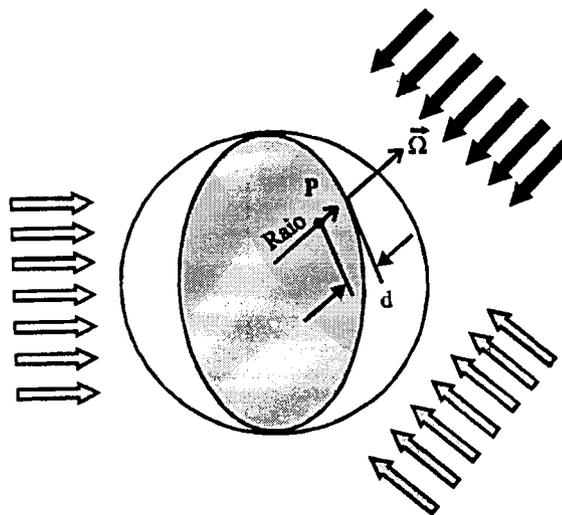


FIG. 2.3 Geometria de irradiação da *esfera ICRU* e o ponto *P* na esfera, no qual o equivalente de dose direcional,  $H'(d, \Omega)$ , é determinado em um campo de radiação expandido, com a direção  $\Omega$  de interesse.

### 2.2.2.2 GRANDEZA OPERACIONAL PARA MONITORAÇÃO PESSOAL

Essa grandeza é definida no indivíduo, em um campo de radiação real, e deve ser medida diretamente sobre o indivíduo. Como seu valor pode variar de pessoa para pessoa, e com o local do corpo onde são feitas as medições, torna-se necessário a obtenção de valores que sirvam de referência. Evidentemente, como os dosímetros individuais não podem ser calibrados diretamente sobre o corpo humano, eles são expostos sobre fantasmas que simulem o corpo humano.

Para monitoração individual, a ICRU recomenda o equivalente de dose pessoal,  $H_p(d)$ , que é apropriado tanto para radiações fortemente penetrantes quanto para as radiações fracamente penetrantes, dependendo do valor de  $d$ .

O equivalente de dose pessoal,  $H_p(d)$ , é o equivalente de dose no *tecido ICRU*, numa profundidade  $d$ , abaixo de um ponto especificado sobre o corpo. Da mesma forma que no equivalente de dose direcional, denotam-se para radiações fracamente penetrantes,  $H_p(0,07)$  e  $H_p(3)$  para pele e cristalino, respectivamente e,  $H_p(10)$  para as radiações fortemente penetrantes.

A unidade utilizada é também o  $J\ kg^{-1}$ , denominada de sievert (Sv).

A TAB. 2.4 apresenta um resumo do uso adequado das grandezas operacionais conforme o tipo de radiação e o objeto de monitoração.

**TAB. 2.4** Resumo das grandezas operacionais

Radiação externa	Grandeza limitante	Grandeza operacional	
		Monitoração de área	Monitoração pessoal
Fortemente penetrante	Dose efetiva	$H^*(10)$	$H_p(10)$
	Dose na pele	$H^*(0,07, \Omega)$	$H_p(0,07)$
Fracamente penetrante	Dose na lente dos olhos	$H'(3, \Omega)$	$H_p(3)$

## 2.3 RADIAÇÕES DE REFERÊNCIA PRODUZIDAS POR FÓTONS

Dentre as atividades da *International Organization for Standardization* (ISO) estão a elaboração e a revisão de normas especificando exigências para as radiações de referência produzidas por fótons, partículas beta e nêutrons, que são utilizadas em proteção radiológica, para a calibração de dosímetros pessoais e monitores de radiação. Para a calibração de monitores de radiação em equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , são necessárias radiações de referência produzidas por fótons.

A partir dessas normas, vários autores apresentaram informações experimentais dos conceitos e procedimentos de calibração, escolha das radiações de referência e suas dosimetrias (THOMPSON, 1978) (FERRARI & PELLICIONI, 1994) (KRAMER et al, 1994) (BÖHM et al, 1999).

### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS E MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Os campos de radiação de referência produzidos por fótons são classificados de acordo com suas origens ou métodos de produção. Esses campos podem ser produzidos por fontes de radionuclídeos, radiações X filtradas, radiações X fluorescentes e fótons de altas energias produzidos por reações nucleares. A ISO (ISO 4037-1, 1996) descreve os métodos para produção e caracterização dessas radiações de referência.

Os campos de radiação são utilizados na calibração de monitores de radiação e medidores de taxa de dose e para a determinação da resposta desses instrumentos em função da energia do fóton. A TAB. 2.5 apresenta todas as qualidades de radiação com suas energias médias. Para as radiações X filtradas, as letras L, N, W ou H representam as séries de espectro, isto é, séries de baixa taxa de kerma no ar (L), espectro-estrito (N), espectro-largo (W) e alta taxa de kerma no ar (H), seguida da tensão geradora em kV (ISO 4037-1, 1996).

Cada série é caracterizada para uma certa faixa em largura espectral e taxa de kerma no ar. O espectro da série de baixa taxa de kerma no ar possui a menor resolução espectral (mais estrito) e a mais baixa taxa de kerma no ar, enquanto que o espectro da série de alta taxa de kerma no ar possui distribuições espectrais muito largas e a mais alta taxa de kerma no ar.

As radiações fluorescentes são representadas pela letra F, seguida pelo símbolo químico do radiador, conforme apresentado na TAB. 2.5. As radiações fluorescentes fornecem campos de radiação, produzidos por fótons, com energias abaixo de 100 keV. As radiações de referência produzidas por reações nucleares são representadas pela letra R, seguida pelo símbolo indicando o tipo de interação.

As fontes de radionuclídeos são representadas pela letra S seguida pelo elemento. Os radionuclídeos  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{241}\text{Am}$  são recomendados na ISO 4037-1, como fontes para campos de radiação de referência. De todas as fontes, o  $^{137}\text{Cs}$  é a radiação mais utilizada nas calibrações de instrumentos de proteção radiológica.

As radiações de referência na faixa de energia entre 4 MeV e 9 MeV são fornecidas para permitir a determinação da resposta de monitores de radiação utilizados em instalações nucleares que produzem campos de radiação de 6 MeV.

**TAB. 2.5** Qualidades de radiação para radiações de referência produzidas por fótons.

Séries de radiações fluorescentes		Séries de baixa taxa de kerma no ar		Séries de espectro estreito		Séries de espectro largo		Séries de alta taxa de kerma no ar	
Qualidade da radiação	Energia (keV)	Qualidade da radiação	$\bar{E}$ (keV)	Qualidade da radiação	$\bar{E}$ (keV)	Qualidade da radiação	$\bar{E}$ (keV)	Qualidade da radiação	$\bar{E}$ (keV)
F-Zn	8,6	L-10	8,5	N-10	8	W-60	45	H-10	7,5
F-Ge	9,9	L-20	17	N-15	12	W-80	57	H-20	12,9
F-Zr	15,8	L-30	26	N-20	16	W-110	79	H-30	19,7
F-Mo	17,5	L-35	30	N-25	20	W-150	104	H-60	37,3
F-Cd	23,2	L-55	48	N-30	24	W-200	137	H-100	57,4
F-Sn	25,3	L-70	60	N-40	33	W-250	173	H-200	102
F-Cs	31,0	L-100	87	N-60	48	W-300	208	H-250	122
F-Nd	37,4	L-125	109	N-80	65			H-280	146
F-Sm	40,1	L-170	149	N-100	83			H-300	147
F-Er	49,1	L-210	185	N-120	100				
F-W	59,3	L-240	211	N-150	118				
F-Au	68,8			N-200	164				
F-Pb	75,0			N-250	208				
F-U	98,4			N-300	250				
<b>Séries de Radionuclídeos</b>				<b>Séries de radiações produzidas por fótons de alta energia</b>					
Qualidade da radiação	Radionuclídeo	$\bar{E}$ (keV)	Qualidade da radiação	Reação	$\bar{E}$ (MeV)				
S-Am	<sup>241</sup> Am	59,5	R-C	<sup>12</sup> C (p,p' $\gamma$ ) <sup>12</sup> C	4,36*				
S-Cs	<sup>137</sup> Cs	662	R-F	<sup>19</sup> F (p, $\alpha$ $\gamma$ ) <sup>16</sup> O	6,61*				
S-Co	<sup>60</sup> Co	1250	R-Ti	(n, $\gamma$ ) captura em Ti	5,14*				
			R-Ni	(n, $\gamma$ ) captura em Ni	6,26*				
			R-O	<sup>16</sup> O(n,p) <sup>16</sup> N	6,61*				

\* Valores médios da fluência em energia.

### 2.3.2 FUNDAMENTOS DE CALIBRAÇÃO RELACIONADOS COM AS GRANDEZAS BÁSICAS QUE CARACTERIZAM O CAMPO DE RADIAÇÃO

A especificação da dosimetria dos campos de radiação é geralmente executada em termos da grandeza *kerma* no ar. Em campos gerados por fótons de alta energia produzidos por reações nucleares, o *kerma* no ar é a grandeza para as condições *receptor-ausente* e em condições *receptor-presente*, é utilizada a dose absorvida no material *tecido-equivalente* ou na água (ISO 4037-2, 1997).

Nas seções da norma ISO 4037-2 são descritos os procedimentos para a determinação dos valores numéricos das grandezas dosimétricas escolhidas e uma orientação é dada sobre como especificar as incertezas associadas com as medidas.

### 2.3.3 CALIBRAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA DE INSTRUMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A calibração de todos os monitores de radiação para proteção radiológica é baseada na determinação do valor convencionalmente verdadeiro do *kerma* no ar no ponto de teste. Por meio dos coeficientes de conversão, para cada radiação de referência, o valor do *kerma* no ar pode ser convertido para o valor da grandeza operacional que o instrumento sob teste está designado a medir, como o equivalente de dose ambiente ou direcional e o equivalente de dose pessoal em fantasmas nas profundidades de 10 mm e 0,07 mm. Dependendo do tipo de grandeza operacional, os coeficientes de conversão devem ser em função do ângulo de incidência da radiação para a direção de referência.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE INSTRUMENTOS DE MONITORAÇÃO DE ÁREA PARA A GRANDEZA $H^*(10)$

Os instrumentos de monitoração de área, ou seja, os monitores de radiação são projetados para caracterizar um ambiente de trabalho por meio de medidas do equivalente de dose ambiente, para radiações fortemente penetrantes, e do equivalente de dose direcional, para radiações fracamente penetrantes.

A resposta de um detector ou de um instrumento é definida como o quociente de sua leitura e o valor verdadeiro convencional que o instrumento pretende medir (ICRU 47, 1992). Desta forma, o termo “*resposta relativa para  $H^*(10)$* ” significa a resposta de um detector ou instrumento usado para medir equivalente de dose ambiente. Outra característica importante é a variação da resposta do detector ou instrumento com a energia da radiação, comumente chamada de *resposta energética*. Por exemplo, um instrumento que possui uma resposta energética constante para medidas de exposição teria uma resposta energética variável para medidas de  $H^*(10)$  desde que, para uma dada fluência, o quociente de  $H^*(10)$  e exposição varie com a energia, conforme mostrado na FIG. 2.4 (ICRU 47, 1992).

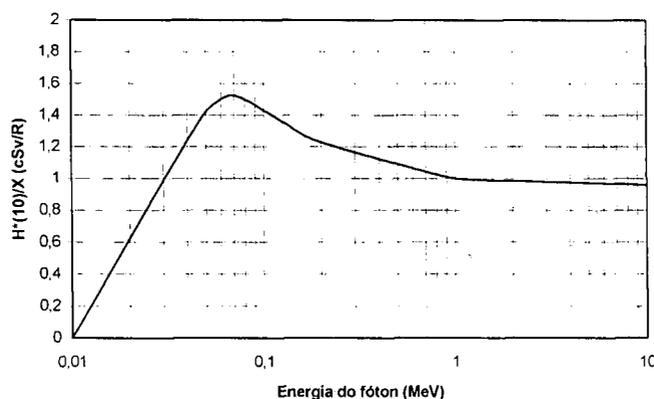


FIG 2.4 Equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$  por unidade de exposição, X, em função da energia do fóton. Exposição obtida no mesmo ponto, mas sem a esfera ICRU.

Para fótons, a resposta energética de um instrumento para equivalente de dose ambiente é diferente daquela para exposição. Conforme apresentado na FIG. 2.4, para energias acima de 300 keV a diferença é pequena. Na faixa de energia de 50 keV a 300 keV, os fótons

espalhados tornam-se importantes e dão origem a uma diferença entre a resposta energética para exposição no ar livre e a resposta energética para equivalente de dose ambiente, que neste caso inclui os espalhamentos na esfera ICRU. Em baixas energias de fótons, a atenuação em 10 mm de material tecido-equivalente da esfera torna-se importante, ocasionando a diminuição do quociente.

É importante ressaltar que a esfera ICRU só é requerida para a definição conceitual das grandezas equivalente de dose ambiente e equivalente de dose direcional. Portanto, é perfeitamente permissível referir-se ao equivalente de dose ambiente ou direcional em qualquer ponto no campo de radiação sem a presença da esfera, já que os coeficientes de conversão utilizados para obtenção dessas grandezas operacionais levam em consideração as diferenças de interação da radiação na esfera e as condições de medições.

A variação da resposta de um instrumento com sua orientação em um campo unidirecional é comumente chamada de *resposta angular* ou *resposta direcional*. O termo *isodirecional* é aplicado a uma resposta que é independente da orientação do instrumento.

O equivalente de dose ambiente em um ponto no campo de radiação, com qualquer distribuição angular, é o valor que resultaria se a mesma fluência e distribuição de energia da radiação estivesse presente em um campo de radiação alinhado. Desta forma, o equivalente de dose é independente da distribuição angular do campo de radiação e um medidor de equivalente de dose ambiente deverá ter uma resposta angular isotrópica.

## 2.5 CARACTERÍSTICAS DO DETECTOR GEIGER-MÜLLER PARA A GRANDEZA $H^*(10)$

Detecores Geiger-Müller (GM) são amplamente utilizados em monitores de radiação para medidas de diversas grandezas de uso em radioproteção. Os equivalentes de doses são determinados a partir do número de contagens, desde que o pulso de saída possua a mesma amplitude, independente da energia das partículas que interagem com o volume sensível do detector.

A resposta relativa em energia de um detector GM para  $H^*(10)$  depende do número atômico e da espessura da parede do detector. A resposta de um detector nu, sem um filtro adicional, aumenta com a diminuição da energia a partir de 300 keV e tem um valor máximo

em torno de 40 a 80 keV, que é algumas vezes maior que a resposta em alta energia. Para melhorar a resposta em baixas energias, adiciona-se um filtro, normalmente estanho (Sn), cádmio (Cd), cobre (Cu), alumínio (Al) ou chumbo (Pb), que é na maioria dos casos perfurado. Desta forma, a resposta inicial pode ser uniforme na faixa de 50 keV a 1250 keV, subindo lentamente para altas energias (ICRP 47,1992).

Alguns trabalhos publicados apresentam métodos de desenvolvimento e características de filtros de compensação que produzem uma resposta energética plana, normalizada para a energia do céscio ( $^{137}\text{Cs}$ ), para uma grande faixa de energia, para medidas de  $H^*(10)$ . Estes filtros são desenvolvidos levando-se em consideração as medidas de kerma no ar e os coeficientes de conversão para  $H^*(10)$  para cada energia (BARCLAY, 1986) (TERRY, 1991).

Neste trabalho, foi utilizado um método para obtenção de filtros de compensação para adequar a resposta energética e angular do MIR 7026, de modo a atender os requisitos da norma IEC 60846. Este método pode ser aplicado em qualquer monitor de radiação para a grandeza  $H^*(10)$  e sua descrição é apresentada na seção 3.2.2.2.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos todos os ensaios radiológicos realizados com o Monitor de Radiação MIR 7026, utilizando seu detector GM interno, de acordo com a metodologia e os procedimentos definidos para medidas de equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ .

Primeiramente, será dada uma descrição dos principais equipamentos e materiais envolvidos na realização dos ensaios e em seguida serão descritos a metodologia e os procedimentos utilizados.

Todos os ensaios descritos foram realizados no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do IRD, sob a supervisão da equipe de orientação.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.1.1 MONITOR INTELIGENTE DE RADIAÇÃO MODELO 7026

O Monitor Inteligente de Radiação MIR Modelo 7026 é um equipamento portátil e extremamente versátil para monitoração de área. O equipamento é baseado em microcontrolador e possui internamente um detector Geiger-Müller para medidas de taxa de exposição, para raios X e gama, na faixa de radiação de fundo até 5 R/h. O MIR 7026 também pode ser utilizado para outras aplicações, mediante a conexão de sondas externas que foram desenvolvidas exclusivamente para este monitor. Sua aplicação visa monitorar locais com presença de radiações ionizantes, servindo tanto para medidas de taxa de exposição como de exposição acumulada.

O MIR 7026 funciona, também, nos modos de medidor de taxa de contagem, medidor de taxa de dose, integrador de dose e contador/temporizador, realizando, portanto, as funções de vários equipamentos de radioproteção. A FIG 3.1 apresenta o MIR 7026.



**FIG. 3.1** Monitor Inteligente de Radiação MIR Modelo 7026.

### 3.1.1.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO

A operação do MIR 7026 é simples devido ao seu alto nível de automação e segurança de operação. O equipamento possui as seguintes características de operação (IEN, 1995):

- a) teste automático do detector e do monitor;
- b) identificação automática da sonda externa;
- c) seleção automática das unidades de leitura;
- d) correção automática de tempo morto;
- e) troca automática de escala;
- f) memória da dose acumulada;
- g) memória do valor máximo de taxa de dose;
- h) alarmes de taxa de dose e de dose acumulada com memória não volátil do nível selecionado;
- i) sinal sonoro pulsado com taxa proporcional ao nível de radiação detectado.

São gerados sinais de alarme sonoro e visual em condições de:

- a) defeito do monitor;
- b) saturação do detector;
- c) falha de alta tensão;

- d) falha de calibração;
- e) bateria fraca;
- f) ultrapassagem do nível de alarme selecionado.

Sua leitura é apresentada de forma digital e analógica (por meio de um gráfico de barras) em um mostrador de cristal líquido. A alimentação é feita por duas pilhas tipo C, recarregáveis ou comuns.

### 3.1.1.2 ESPECIFICAÇÕES RADIOLÓGICAS, ELÉTRICAS E MECÂNICAS

Os ensaios de desempenho realizados no protótipo do MIR 7026, utilizando o detector GM interno, foram efetuados com o equipamento nas condições padrões de ensaio definidas na norma NBR 10.011: *Medidores e Monitores Portáteis de Taxa de Exposição de Raios X e Gama, para Uso em Proteção Radiológica*, da ABNT. Estes ensaios foram aprovados de acordo com os requisitos desta norma, que foi utilizada como referência.

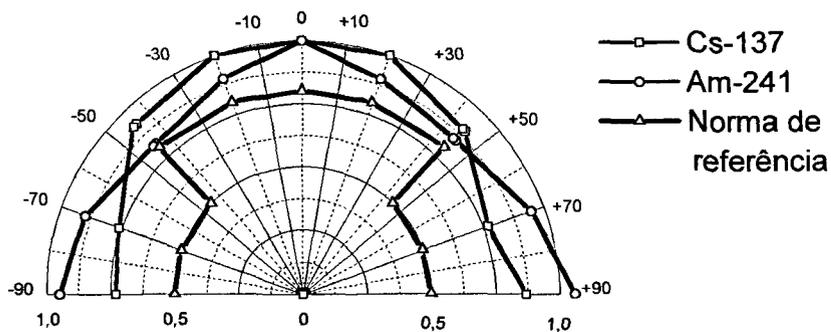
As especificações radiológicas, elétricas e mecânicas são (IEN, 1995):

- ◆ Radiações detectadas: Raios X e gama.
- ◆ Detector: Geiger-Müller LND 713 com filtro de compensação.
- ◆ Faixa de operação: de radiação de fundo até 5 R/h.
- ◆ Erro intrínseco da leitura:  $\pm 20\%$  em toda a faixa de operação do equipamento.
- ◆ Resposta angular para o  $^{241}\text{Am}$  e o  $^{137}\text{Cs}$ : Vide FIG. 3.2.
- ◆ Resposta energética normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ : Vide TAB. 3.1.
- ◆ Medidas efetuadas: Vide TAB. 3.2.
- ◆ Tempo máximo de integração: 99 horas.
- ◆ Integração máxima: 100 R ou 1 Sv.
- ◆ Sobrecontagem do contador: 8000000 contagens.
- ◆ Tipo de leitura: Digital – Vide TAB. 3.3.

Analógica – Por meio de gráfico de barras com 6 décadas.

- ◆ Tempo de resposta para atingir 90 % do valor medido: Aproximadamente 2,5 s para variações de contagens fora do intervalo entre a média e  $\pm 2$  vezes o desvio padrão.

- ◆ Temperatura de operação: de 0 °C a 50 °C.
- ◆ Variação da leitura com a temperatura:  $\pm 3\%$  do valor medido.
- ◆ Umidade relativa de operação: de 55 % a 95 %.
- ◆ Variação da leitura com a umidade relativa:  $\pm 2\%$  do valor medido.
- ◆ Alimentação: 2 pilhas tipo C, recarregáveis ou comuns.
- ◆ Duração das pilhas: 200 horas de uso contínuo.
- ◆ Dimensões: (180 x 57 x 110) mm.
- ◆ Peso: 650 g, incluindo as pilhas.



**FIG. 3.2** Resposta angular para o  $^{137}\text{Cs}$  e o  $^{241}\text{Am}$  do MIR 7026.

**TAB. 3.1** Resposta energética normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ .

Radionuclídeo	Energia (keV)	Resposta
$^{241}\text{Am}$	60	1,02
$^{137}\text{Cs}$	662	1,00
$^{226}\text{Ra}$	840	1,12
$^{60}\text{Co}$	1252	1,04

**TAB. 3.2** Medidas efetuadas.

<b>Grandeza</b>	<b>Unidade</b>
Taxa de contagem	CPS ou CPM
Taxa de exposição	R/h
Taxa de dose	Sv/h
Exposição integrada	R
Dose integrada	Sv
Contagem	Contagens em 10 s, 20 s, 50 s, 100 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min ou 60 min.

**TAB. 3.3** Apresentação da leitura no mostrador.

<b>Unidade</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Apresentação no mostrador</b>
CPS e CPM	0 a 100	.0 a 99.9
	100 a 1000	100 a 999
	1000 a 10000	1.00k a 9.99k
	10000 a 100000	10.0k a 99.9k
	100000 a 1000000	100k a 999k
	1000000 a 10000000	1.00M a 9.99M
mR/h, mR, mSv/h e mSv	0 a 10	.00 a 9.99
	10 a 100	10.0 a 99.9
	100 a 1000	100 a 999
R/h, R, Sv/h e Sv	1 a 10	1.00 a 9.99
	10 a 100	10.0 a 99.9
	100 a 1000	100 a 999

### 3.1.1.3 DESCRIÇÃO EM BLOCOS

As FIG. 3.3 e 3.4 apresentam respectivamente, o diagrama em blocos do MIR 7026 e o diagrama em blocos das sondas (interna e externas) utilizadas com o MIR 7026.

O MIR 7026 pode ser representado pelos seguintes blocos funcionais:

#### a) Microcontrolador

O microcontrolador efetua o processamento dos pulsos detectados para o cálculo da taxa de contagem e a correção da taxa de contagem média em função do tempo morto da sonda utilizada. Através do conector de acoplamento das sondas externas ao equipamento, o microcontrolador identifica a sonda utilizada e efetua a seleção das unidades de leitura para a sonda.

#### b) Memória

Este bloco é o responsável pelo armazenamento do *software* de operação do MIR 7026. A memória utilizada é uma EPROM 27C256 de 32 kbytes x 8.

#### c) Teclado

O microcontrolador verifica periodicamente se alguma tecla está sendo acionada e, em caso afirmativo, efetua a função selecionada pelo usuário. Por intermédio do teclado o usuário controla a operação do equipamento.

O teclado é constituído pela teclas: +, -, **MODO**, **ÁUDIO** e **DESL.**.

#### d) Mostrador

O mostrador apresenta as informações analógicas (por meio de um gráfico de barras) e digitais dos valores medidos, assim como as informações correspondentes à condição de operação do equipamento.

. O microcontrolador envia as informações a serem apresentadas no mostrador por meio do seu barramento de dados. Por meio de um potenciômetro interno o usuário pode ajustar a intensidade desejada para o mostrador digital.

e) Alimentação

A alimentação é feita por duas pilhas (recarregáveis ou comuns). Através de um conversor CC-CC, a tensão fornecida pelas pilhas é aumentada de 3 V para 5 V. Esta tensão alimentará todos os circuitos do equipamento. Um circuito de teste do estado das pilhas informa quando as mesmas estão esgotadas.

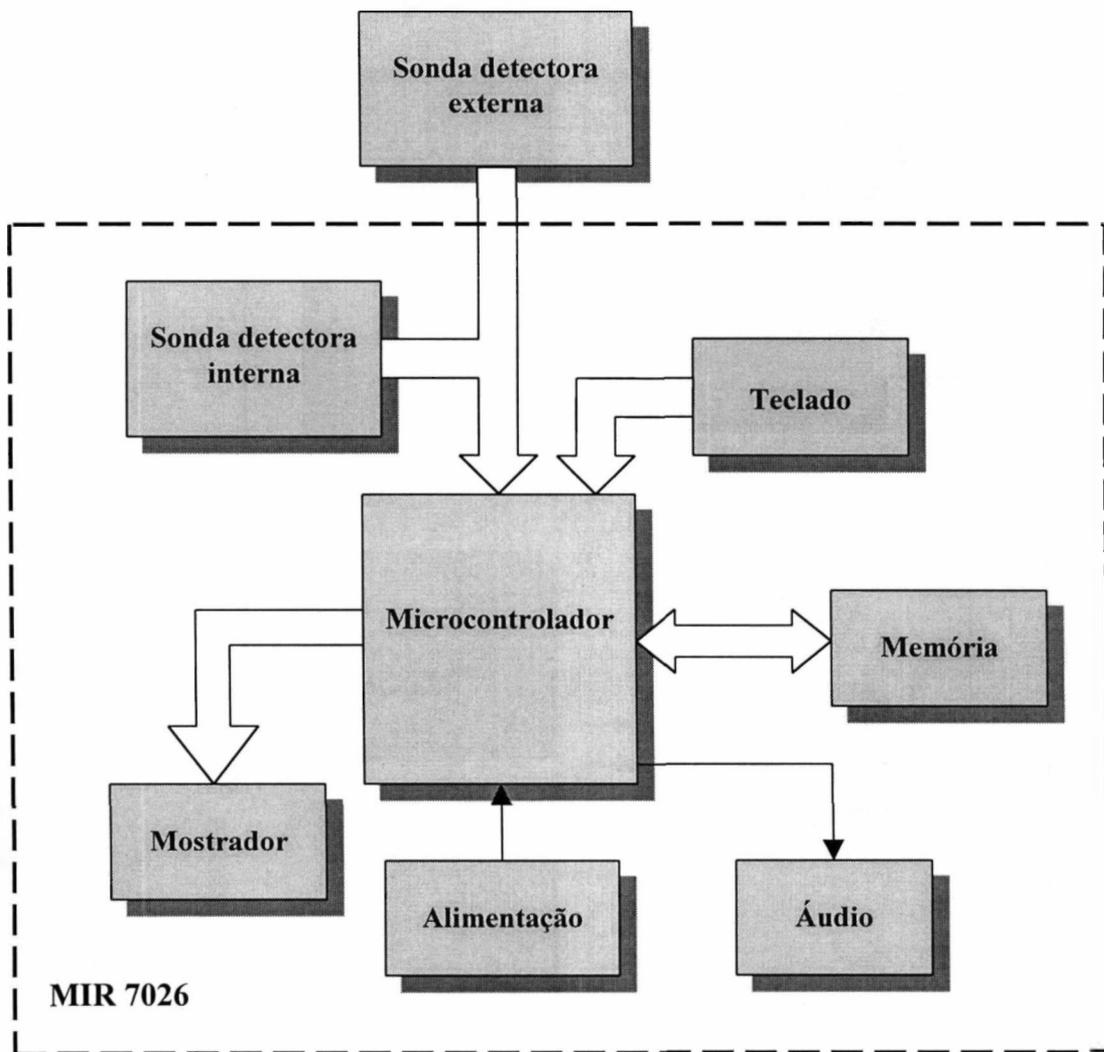
f) Áudio

Este bloco é responsável pela sinalização sonora do equipamento. Estes sinais sonoros foram descritos na seção 3.1.1.1.

g) Sonda detectora

O detector, polarizado pela fonte de alta-tensão, gera pulsos quando penetrado por partículas ou fótons. Os pulsos são selecionados em amplitude pelo discriminador para que pulsos indesejáveis que efetivamente não representem a penetração de partículas ou fótons no detector não sejam processados, tais como, ruídos eletrônicos de pequena amplitude. Os pulsos selecionados são normalizados em amplitude pelo conformador e enviados para o microcontrolador.

Além do sinal de pulsos detectados, são enviados ao microcontrolador a frequência de calibração do detector e os sinais codificados de indicação de funcionamento da fonte de alta-tensão, indicação de saturação do detector e identificação da sonda detectora que está sendo utilizada.



**FIG. 3.3** Diagrama em blocos do MIR 7026.

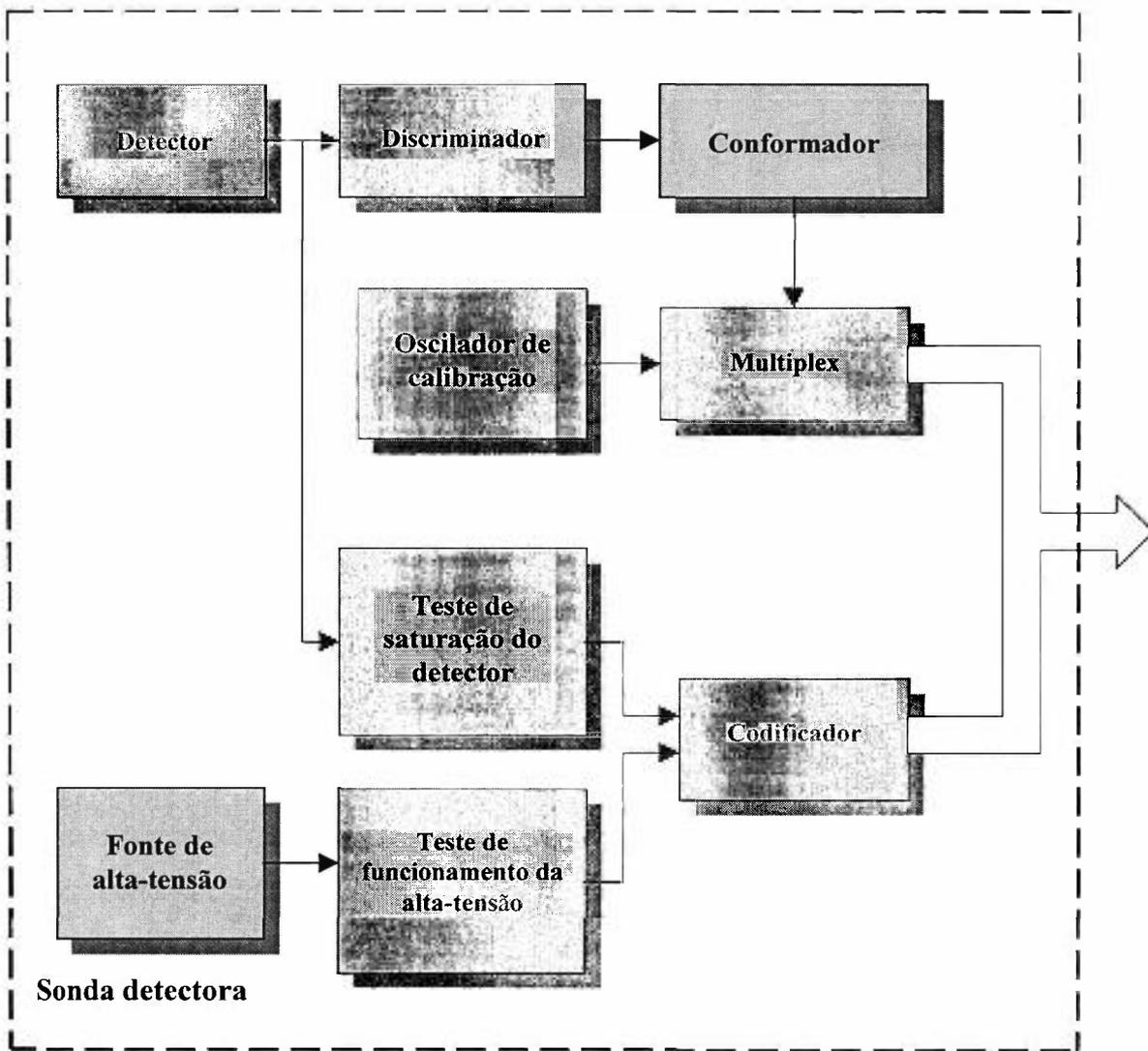


FIG. 3.4 Diagrama em blocos das sondas (interna e externas) do MIR 7026.

### 3.1.2 GERADOR DE RAIOS X SIEMENS MODELO STABILIPAN 300

O gerador de raios X da Siemens Modelo Stabilipan 300, instalado no LNMRI/IRD, é um equipamento dedicado para radioterapia, mas mediante um arranjo adequado é utilizado para calibração de dosímetros pessoais e monitores de radiação. Esta unidade de raios X, utilizada neste trabalho, fornece campos de radiações X filtradas de referência desde 48 keV (N-60) até 208 keV (N-250) da série de espectro-estrito (N), para a calibração de monitores de radiação, de acordo com as recomendações da IEC (IEC 60846, 1999). As qualidades de radiação da série de espectro-estrito são conseguidas com a colocação, na saída do gerador de raios X, de uma roda de filtros específica para radioproteção, além do ajuste correto da alta tensão no tubo.

A seguir serão descritas as principais partes que constituem o gerador de raios X da Siemens Modelo Stabilipan 300. O diagrama em blocos simplificado e as fotos da unidade de raios X podem ser vistos nas FIG. 3.5, FIG. 3.6 e FIG. 3.7.

#### 3.1.2.1 MESA DE CONTROLE

Na mesa de controle estão dispostos os circuitos que permitem ligar a unidade de raios X e realizar o controle de alta-tensão e corrente aplicados ao tubo de raios X, necessários para obtenção da qualidade de radiação desejada. A FIG. 3.6 apresenta a mesa de controle da unidade de raios X.

#### 3.1.2.2 GERADOR DE ALTA TENSÃO

A função do gerador de alta tensão é produzir a diferença de potencial necessária para acelerar os elétrons, que irão gerar os raios X. Estes potenciais são produzidos por transformadores elétricos que trabalham com a frequência nominal da rede elétrica (60 Hz).

A unidade de raios X Stabilipan 300 possui um gerador de alta tensão que fornece um potencial máximo de 300 kV de pico (SIEMENS, 1965).

### 3.1.2.3 TUBO DE RAIOS X

Para produzir raios X, além do gerador de alta tensão é necessário dispor de uma fonte de elétrons e de um material (anodo) para *freiar* os elétrons acelerados pela alta tensão, convertendo a energia cinética dos elétrons em raios X. Este material, utilizado como anodo, tem que ter um alto número atômico, para aumentar a probabilidade de ocorrer a emissão de raios X, além de apresentar um altíssimo ponto de fusão e uma boa condutibilidade térmica (ATTIX, 1986). O tungstênio é o elemento mais utilizado para a construção dos anodos dos tubos de raios X.

O tubo de raios X da unidade Stabilipan 300 possui um anodo fixo de tungstênio com uma janela de 1 mm de berílio (SIEMENS, 1965), apresentando uma filtração inerente equivalente a 1,4 mm de alumínio, que é ajustada para 4 mm de alumínio adicionando-se 2,6 mm de alumínio, de acordo com a norma ISO (ISO 4037-1, 1996). A FIG. 3.7 mostra a posição da filtração adicional de 2,6 mm de alumínio.

### 3.1.2.4 RODA DE FILTROS

Essa filtração que se adiciona àquela inerente ao tubo do raios X, associada a outros parâmetros intrínsecos ao equipamento, como: forma de onda no gerador de alta tensão, tensão de pico, ângulo do alvo e material do alvo, é que determina a qualidade do feixe de raios X. Esta qualidade é verificada por meio de medidas de *camada semi redutora (CSR)*, que é a espessura de alumínio, cobre, estanho ou chumbo que adicionada à filtração inerente do equipamento produz uma exposição igual à metade daquela obtida sem essa filtração.

A unidade de raios X Stabilipan 300 dispõe de uma roda de filtros formada basicamente de cobre, estanho e chumbo. Um sistema de controle permite girar a roda de filtros para selecionar a filtração adicional, afim de se obter a qualidade de radiação desejada da série de

espectro estreito (N-60 a N-250). A FIG. 3.7 mostra a roda de filtros utilizada na unidade de raios X.

### 3.1.2.5 CÂMARA MONITORA

Devido à pouca estabilidade do gerador de alta tensão, a função fundamental dessa câmara monitora, que é uma câmara de ionização especial, é o controle de qualidade, monitorando o feixe de raios X e a seleção correta dos fatores da técnica de irradiação e dos filtros adicionais (SIEMENS, 1965).

A unidade de raios X Stabilipan 300 utiliza uma câmara monitora modelo 7816, série 18, da PTW – Freiburg. A FIG. 3.7 mostra a câmara monitora utilizada na unidade de raios X.

### 3.1.2.6 COLIMADOR

A redução do tamanho do campo radioativo é o principal método de controle e redução da radiação espalhada.

A unidade de raios X Stabilipan 300 dispõe de um colimador único feito de chumbo, posicionado a 43 cm do tubo de raios X que delimita o campo de radiação em 32 cm de diâmetro a 2 m do tubo de raios X, suficiente para irradiar todo o equipamento que está sendo calibrado. A FIG. 3.7 mostra o colimador utilizado na unidade de raio X.

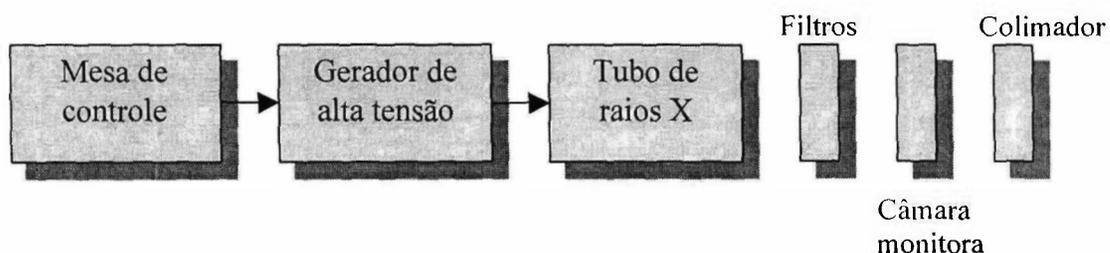
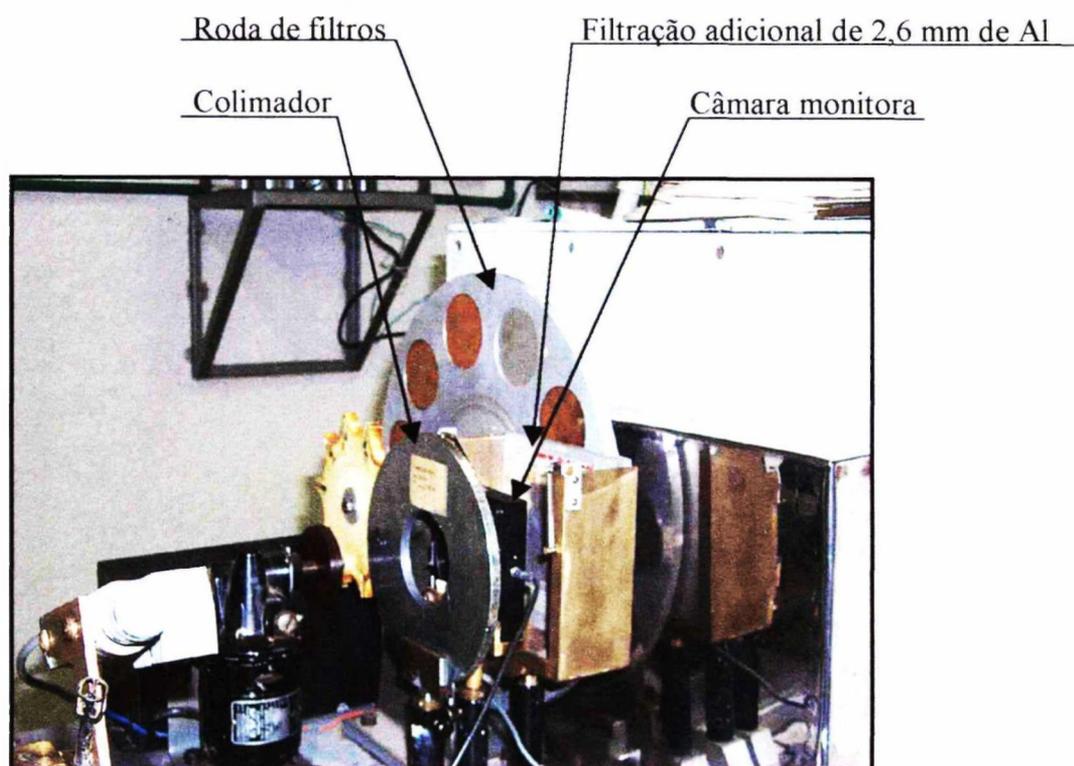


FIG. 3.5 Diagrama em blocos simplificado do gerador de raios X da Siemens, modelo Stabilipan 300.



**FIG. 3.6** Fotografia da mesa de controle do gerador de raios X Stabilipan 300.



**FIG. 3.7** Fotografia do gerador de raios X Stabilipan 300.

### 3.1.3 FONTES RADIOATIVAS UTILIZADAS

Neste trabalho foram utilizados os radionuclídeos  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ , como fontes radioativas para produção de campos de radiação gama de referência, conforme recomendações das normas ISO e IEC (ISO 4037-1, 1996) (ISO 4037- 3, 1997) (IEC 60846, 1999). Estas fontes, uma de  $^{60}\text{Co}$  e três de  $^{137}\text{Cs}$ , estão instaladas no sistema de calibração da sala de calibração de instrumentos de uso em radioproteção, no LMNRI/IRD. As fontes radioativas são todas pontuais e isotrópicas, fabricadas pelo *Laboratoire de Metrologie des l'Energie Atomique* na França. As características das fontes são (LNMRI, 2000):

a) Fonte de  $^{60}\text{Co}$

Modelo: EGD2

Série: B 390

Atividade:  $2,92 \times 10^9$  Bq (78,9 mCi) em 23/02/1973

Taxa de *kerma* no ar a 1 metro: 0,902 mGy/h em 23/02/1973

b) Fonte de  $^{137}\text{Cs}$

Modelo: EGD3

Série: 260

Atividade:  $2,12 \times 10^{10}$  Bq (573 mCi) em 23/02/1973

Taxa de *kerma* no ar a 1 metro: 1,69 mGy/h em 23/02/1973

c) Fonte de  $^{137}\text{Cs}$

Modelo: EGD3

Série: 186

Atividade:  $1,10 \times 10^{11}$  Bq (2,97 Ci) em 23/02/1973

Taxa de *kerma* no ar a 1 metro: 8,72 mGy/h em 23/02/1973

d) Fonte de  $^{137}\text{Cs}$

Modelo: CS 104

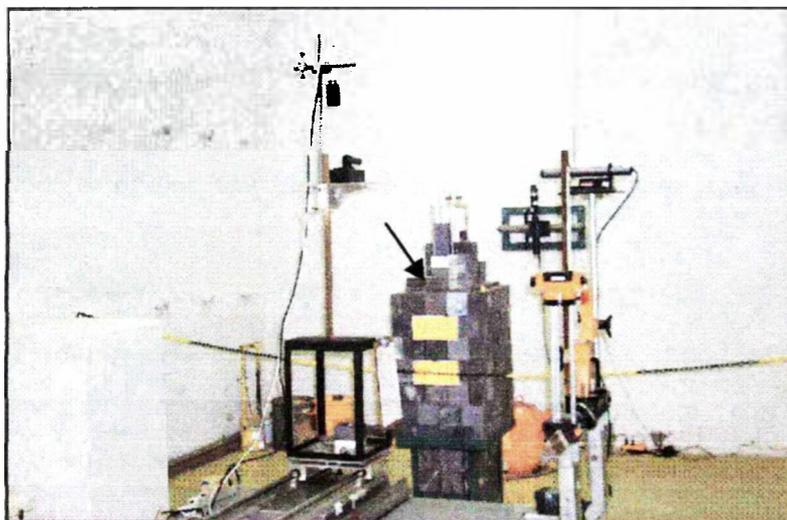
Série: AG 544

Atividade:  $2,56 \times 10^{11}$  Bq (6,92 Ci) em 15/03/1990

Taxa de *kerma* no ar a 1 metro: 0.203 Gy/h em 15/03/1990

As fontes radioativas ficam armazenadas em uma blindagem, construída no IRD, composta de uma armação em perfil de ferro pintado, com prateleiras onde estão distribuídos os blocos de chumbo de 10x10x10 cm. Esses blocos de chumbo estão distribuídos de acordo com a maior ou menor necessidade de blindagem.

Para a exposição e recolhimento de modo seguro das fontes radioativas, existe um sistema posicionador de fontes, composto de: suporte metálico telescópico, módulo de alimentação, módulo de comando e sinalização de fontes. A FIG. 3.8 apresenta a fotografia do sistema de calibração que mostra a blindagem, onde estão armazenadas as fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e a de  $^{60}\text{Co}$ , na sala de calibração do LNMRI/IRD.



**FIG. 3.8** Fotografia do sistema de calibração que mostra a blindagem, sinalizada pela seta, onde estão armazenadas as fontes radioativas.

## 3.2 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

### 3.2.1 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA DE MONITORES DE RADIAÇÃO PARA $H^*(10)$

Para cada um dos procedimentos de ensaios radiológicos elaborados neste trabalho, a metodologia básica consiste em expor o monitor de radiação a feixes de radiação X filtrada ou de fótons do  $^{60}\text{Co}$  ou do  $^{137}\text{Cs}$  em um ponto onde o valor verdadeiro convencional da grandeza radiológica de calibração (*kerma* no ar) seja conhecido e rastreável. O valor do *kerma* no ar é convertido para o equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , por meio dos coeficientes de conversão tabelados na ISO (ISO 4037-3, 1997).

O método foi desenvolvido em 4 etapas:

- a) Medir a resposta energética do Monitor MIR7026 com o detector GM interno sem filtro de compensação;
- b) Desenvolver filtros de compensação para adequar a resposta de acordo com a norma IEC 60846;
- c) Medir a resposta energética do Monitor MIR7026, utilizando em torno do GM interno cada um dos filtros desenvolvidos;
- d) Medir da resposta angular, utilizando o filtro que proporcionou a melhor correção na resposta energética.

Para radiação gama, o valor verdadeiro convencional da grandeza radiológica é determinado com base nos resultados da dosimetria mais recente, corrigidos para o decaimento da fonte considerada.

A dosimetria do feixe de radiação gama é feita pela determinação da variação da taxa de *kerma* no ar em função da distância, utilizando para isso uma câmara de ionização padrão calibrada em termos da grandeza de referência (LNMRI, 2000).

Para otimizar a determinação da grandeza de calibração, foi utilizada uma planilha em *MS Excel* desenvolvida no LNMRI que calcula o decaimento radioativo das fontes e a taxa de *kerma* no ar e/ou a distância da fonte.

A dosimetria, além de corrigir a contribuição da radiação espalhada, reduz a incerteza na determinação da grandeza *kerma* no ar e estabelece a rastreabilidade dos instrumentos ao sistema metrológico internacional.

Para radiação X, o valor verdadeiro convencional da grandeza *kerma* no ar foi determinado com base nos resultados da dosimetria para cada qualidade de radiação, que será descrita na seção 3.2.2.1.

As condições ambientais de cada ensaio realizado, foram mantidas o mais próximo possível das condições ambientais de referência (IEC 60846, 1999), isto é, temperatura de 20°C, umidade relativa de 65 % e pressão atmosférica de 101,3 kPa. Para atender esses requisitos, as salas de calibração (gama e raios X) são equipadas com condicionadores de ar, para controle de temperatura, e desumidificador de ar, para controle de umidade, além de medidores de temperatura e pressão. Qualquer discordância das condições de referência foram corrigidas, quando necessário, pela EQ. 3.1:

$$F(T, P) = \left( \frac{273,15 + T}{293,15} \right) \left( \frac{101,3}{P} \right) \quad (\text{EQ. 3.1})$$

onde  $F(T, P)$  é o fator de correção para a temperatura  $T$  e a pressão  $P$ .

A radiação de fundo durante os ensaios foi mantida dentro da condição de referência, que é de 0,1  $\mu\text{Sv/h}$  (IEC 60846, 1999).

### 3.2.2 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA

Este procedimento foi dividido em dois: um procedimento para determinação da resposta energética para radiações X filtradas (48 keV a 208 keV) e outro para radiação de fótons do  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) e do  $^{60}\text{Co}$  (1250 keV).

Inicialmente, os procedimentos foram aplicados no MIR 7026 com o GM interno sem filtro de compensação. Esta condição de ensaio é necessária para, a partir da resposta obtida para a grandeza  $H^*(10)$ , desenvolver filtros de compensação para normalizar a resposta do instrumento para a faixa de energia de 48 keV a 1250 keV e atender aos requisitos da norma IEC 60846.

Todos os procedimentos elaborados e utilizados nestes ensaios foram baseados nas recomendações da ISO (ISO 4037-1, 1996) (ISO 4037-2, 1997) (ISO 4037-3, 1997) e da IEC (IEC 60846, 1999) e se aplicam não só na determinação da resposta energética do MIR 7026, mas também na determinação da resposta energética de qualquer monitor de radiação para a grandeza  $H^*(10)$ .

#### 3.2.2.1 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA PARA RADIAÇÕES X FILTRADAS

Para a execução deste procedimento foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Gerador de raios X da Siemens, modelo Stabilipan 300;
- b) Câmara monitora modelo 7816, série 18 da PTW-Freiburg, polarizada com 300 V;
- c) Câmara de ionização padrão esférica (1 litro) modelo M32002, série 025 da PTW-Freiburg, polarizada com – 400 V;
- d) Conjunto, calibrado no LNMRI, formado por Eletrômetro modelo 610 C, série 144875 da KEITHLEY e Multímetro digital modelo 179 A, série 168439 da KEITHLEY, utilizado para medida de carga da câmara monitora modelo 7816;

- e) Eletrômetro modelo 6517A, série 0657346 da KEITHLEY, calibrado no LMNRI, utilizado para medida de carga da câmara de ionização padrão modelo M32002;
- f) Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026, série 001:  
 Modo de operação: R/h;  
 Alarme: selecionado em 10MCPS (taxa) e em 100 R (exposição);
- g) Termômetro digital modelo 8502-25, série 87342462 da COLE PALMER;
- h) Barômetro modelo MK-2, tipo 2236A, série A130 da CROYDAN;
- i) Cronômetro digital da TECHNOS.

Os procedimentos elaborados e utilizados neste ensaio foram os seguintes:

- a) O ponto de referência da câmara de ionização padrão (M32002), calibrada em termos da grandeza *kerma* no ar, foi posicionado a 2,0 m (ISO 4037-3, 1997) do tubo de raios X;
- b) A câmara padrão foi irradiada com qualidades de radiação X filtrada (N-60 a N-250) e uma dosimetria foi realizada, para cada qualidade de radiação, a partir de uma série de 5 leituras consecutivas da carga acumulada na câmara monitora (CM) e na câmara padrão (CP) em um intervalo de 120 segundos;
- c) A média da razão entre a taxa de leitura da CP e a taxa de leitura CM foi obtida para cada qualidade de radiação X;
- d) A partir do fator de calibração da CP ( $F_{cp}$ ), dado em Gy/C, (Certificado de calibração 3875, PTB, 1999) foi obtido o fator de calibração da câmara monitora ( $F_{cm}$ ) em Gy/unidades de escala, para cada qualidade, pelas EQ. 3.2 e EQ. 3.3:

$$F_{cp} = 2,556 \times 10^4 \text{ Gy} / C \times Kq \quad (\text{EQ. 3.2})$$

$$F_{cm} = \text{média}(\dot{CP} / \dot{CM}) \times F_{cp} \quad (\text{EQ. 3.3})$$

onde  $Kq$  é o fator de correção para cada qualidade de radiação, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , fornecido pelo certificado de calibração da câmara padrão (Certificado de calibração 3875, PTB, 1999). A TAB. 3.4 apresenta os valores de  $Kq$ .

- e) Após a realização da dosimetria para a calibração da câmara monitora para cada qualidade de radiação, o Monitor MIR 7026 foi posicionado no lugar da câmara padrão e o centro efetivo do volume sensível do detector GM foi alinhado com o feixe de raios X;
- f) Foi realizada, para cada qualidade de radiação X, uma série de 5 leituras consecutivas da carga acumulada na câmara monitora (CM) em um intervalo de 60 segundos e 10 leituras no Monitor MIR 7026, em unidades de exposição. Cada leitura no MIR 7026 foi defasada da anterior por um intervalo mínimo de 1,5 vezes o tempo de resposta do Monitor (2,5 segundos). Para cada qualidade, a corrente no tubo de raios X foi ajustada de modo a produzir uma taxa de exposição dentro da faixa de medida do Monitor MIR 7026;
- g) Foi obtida a média da taxa de leitura da câmara monitora e a sua correção para a temperatura e pressão de referência por meio da EQ 3.1, para cada qualidade;
- h) A taxa verdadeira convencional de *kerma* no ar, em Gy/h, para cada qualidade, foi obtida utilizando a EQ 3.4:

$$\dot{K}_{ar} = \text{média } \dot{CM} \times F(T, P) \times F_{cm} \times 3600 \quad (\text{EQ 3.4})$$

- i) A taxa verdadeira convencional de  $H^*(10)$ , em Sv/h, para cada qualidade, foi obtida por meio da EQ. 3.5:

$$H^*(10) = \dot{K}_{ar} \times h^*k \quad (\text{EQ. 3.5})$$

onde  $h^*k$  é o coeficiente de conversão de  $\dot{K}_{ar}$  para  $H^*(10)$ . A TAB. 3.5 apresenta os valores de  $h^*k$  para radiação X filtrada.

- j) Para cada qualidade da radiação, foi obtida a resposta (R), neste caso em mR/mSv, do Monitor MIR para a grandeza  $H^*(10)$  por meio da EQ. 3.6:

$$R = \frac{\bar{L}}{\dot{H}^*(10)} \quad (\text{EQ. 3.6})$$

onde  $\bar{L}$  é o valor médio das 10 leituras realizadas no Monitor MIR7026.

**TAB 3.4** Fatores de correção,  $Kq$ , para cada qualidade da radiação, fornecido pelo certificado de calibração da câmara padrão (Certificado de calibração 3875, PTB, 1999).

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b><math>Kq</math></b>
N-60	0,966
N-80	0,962
N-100	0,966
N-120	0,973
N-150	0,974
N-200	0,978
N-250	0,985

**TAB 3.5** Coeficientes de conversão,  $h^*k$ , de kerma no ar,  $K_{ar}$ , para equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , para radiação X filtrada, a uma distância de referência de 2,0 m (ISO 4037-3, 1997).

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b><math>h^*k</math> (Sv/Gy)</b>
N-60	1,59
N-80	1,73
N-100	1,71
N-120	1,64
N-150	1,58
N-200	1,46
N-250	1,39

### 3.2.2.2 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA PARA RADIAÇÕES GAMA

Para a execução deste procedimento foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Fontes radioativas de referência de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ . Essas fontes foram descritas no item 3.1.3;
- b) Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026, série 001:  
Modo de operação: R/h;  
Alarme: selecionado em 10MCPS (taxa) e em 100 R;

Os procedimentos elaborados e utilizados neste ensaio foram os seguintes:

- a) O detector do Monitor MIR 7026 foi exposto a um feixe de radiação gama proveniente das fontes de referência, direcionado ao centro efetivo do volume sensível do detector;
- b) Utilizando a planilha desenvolvida pelo LNMRI, foi obtida a distância correspondente à taxa verdadeira convencional de *kerma* no ar de 440  $\mu\text{Gy/h}$  para o  $^{137}\text{Cs}$  e 35  $\mu\text{Gy/h}$  para  $^{60}\text{Co}$ . O monitor foi posicionado nesta distância;
- c) O monitor foi irradiado e foram realizadas 10 leituras, em unidades de exposição, para cada energia. Cada leitura no MIR 7026 foi defasada da anterior por um intervalo mínimo de 1,5 vezes o tempo de resposta do monitor (2,5 segundos);
- d) A taxa verdadeira convencional de  $H^*(10)$ , em Sv/h, para cada energia, foi obtida por meio da EQ. 3.5. Os valores de  $h*k$  para as fontes radioativas de referência são apresentados na TAB 3.6;
- e) Para cada qualidade da radiação, foi obtida a resposta (R), neste caso em mR/mSv, do Monitor MIR para a grandeza  $H^*(10)$  por meio da EQ. 3.6.

TAB. 3.6 Coeficientes de conversão,  $h^*k$ , de kerma no ar,  $K_{ar}$ , para equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , para radiação gama (ISO 4037-3, 1997).

Qualidade da Radiação	Dist. Irrad. (m)	$h^*k$ (Sv/Gy)
S-Cs	1,0-3,0	1,20
S-Co	1,0-3,0	1,16

Os valores de resposta do Monitor MIR 7026, normalizados para a resposta na energia do  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV), para a faixa de energia de 48 keV a 1250 keV foram obtidos e são apresentados na seção 4.2, assim como a curva de resposta energética para esta faixa de energia.

A partir da curva de resposta energética, que geralmente apresenta um pico situado na faixa de 40 a 80 keV, foram desenvolvidos filtros para reduzir este pico e consequentemente satisfazer aos requisitos da norma, ou seja, manter a variação da resposta dentro de  $\pm 40\%$  para a faixa de energia de 80 keV a 1,25 MeV e ângulo de incidência de  $0^\circ$  a  $\pm 45^\circ$ , em relação a resposta para a radiação de referência produzida pelo  $^{137}\text{Cs}$  com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  (IEC 60846, 1999).

Para auxiliar a obtenção do filtro que envolve o detector GM interno, foi utilizado um programa em linguagem C (OLIVEIRA, 1993). Este programa, que foi desenvolvido para simular filtros de compensação para a grandeza exposição e para algumas energias da radiação, foi alterado e adequado para a grandeza  $H^*(10)$  e para todas as energias utilizadas neste trabalho.

O programa utiliza a equação de atenuação exponencial de um feixe em uma blindagem (filtro) composta por  $n$  materiais com furos (áreas vazadas) concêntricos de mesmo raio (igualmente vazados), e a resposta energética do MIR 7026 com o detector interno nu para calcular a curva de resposta energética do MIR 7026 para todas as condições de espessura das paredes e percentuais de buracos dos materiais. Os buracos ou uma área vazada são necessários porque, geralmente, a espessura da parede do material do filtro necessária para adequar a resposta para valores exigidos por norma, produz uma atenuação muito grande no feixe incidente para radiações abaixo de 100 keV (BARCLAY, 1986) (TERRY, 1991).

O programa, para cada curva de resposta obtida, calcula o desvio médio quadrático dos valores obtidos para as energias em relação ao valor para a energia de referência (662 keV). Ao final do processamento, a combinação que apresentar o menor desvio, é assumida como sendo a combinação ótima (filtro ótimo). A listagem do programa é apresentada no APÊNDICE 3.

### 3.2.3 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ANGULAR

Assim como os procedimentos anteriores, os procedimentos elaborados e utilizados neste ensaio foram baseados nas recomendações da ISO (ISO 4037-1, 1996) (ISO 4037-2, 1997) (ISO 4037-3, 1997) e da IEC (IEC 60846, 1999) e podem ser aplicados a qualquer monitor de radiação para a determinação da resposta angular para a grandeza  $H^*(10)$ .

Para a execução deste procedimento foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Gerador de raios X da Siemens, modelo Stabilipan 300;
- b) Câmara monitora modelo 7816, série 18 da PTW-Freiburg, polarizada com 300 V;
- c) Conjunto, calibrado no LNMRI, formado por Eletrômetro modelo 610 C, série 144875 da KEITHLEY e Multímetro digital modelo 179 A, série 168439 da KEITHLEY, utilizado para medida de carga da câmara monitora modelo 7816;
- f) Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026, série 001:  
Modo de operação: Sv/h;  
Alarme: selecionado em 10 Sv;
- g) Termômetro digital model 8502-25, série 87342462 da COLE PALMER;
- h) Barômetro modelo MK-2, tipo 2236A, série A130 da CROYDAN;
- i) Cronômetro digital TECHNOS.

Os procedimentos elaborados e utilizados neste ensaio foram os seguintes:

- a) A partir da curva de resposta energética corrigida, normalizada para a resposta na energia do  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV), foi escolhida a energia de 83 keV (energia inicial da faixa

- exigida pela IEC60846) e a energia que proporcionou a menor resposta dentro da faixa de 48 keV a 1250 keV;
- b) Os procedimentos descritos nos itens **f** a **j** da seção 3.2.2.1 foram realizados somente para as energias escolhidas e para diversos ângulos de incidência da radiação. Neste caso, o MIR7026 foi operado em Sv/h, que é a unidade da grandeza taxa de equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ .
- c) Considerando a direção de referência como ângulo de  $0^\circ$ , a resposta foi determinada para ângulos de incidência de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ , em dois planos perpendiculares (horizontal e vertical) contendo a direção de referência, através do ponto de referência do MIR7026;
- d) O desvio relativo entre a resposta para cada ângulo de incidência da radiação e a resposta na energia do  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) na direção de referência foi determinado pela EQ 3.7:

$$Desvio(\%) = \frac{R - R_{ref}}{R_{ref}} \times 100 \quad (\text{EQ. 3.7})$$

onde:

R = valor da resposta do MIR7026 para cada ângulo de incidência da radiação;

$R_{ref}$  = valor da resposta do MIR7026 na energia de 662 keV na direção de referência ( $0^\circ$ ).

A seção 4.4 apresenta o resultado deste teste.

### 3.3 INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS MEDIÇÕES

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de tal forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos por uma norma.

Nesse trabalho as incertezas associadas às medições, para determinação da resposta energética e angular, foram avaliadas e calculadas. A metodologia utilizada para o cálculo das incertezas é apresentada no ANEXO 2 e segue as recomendações da Segunda Edição Brasileira do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (INMETRO, 1998). Os tipos de incertezas, as fontes de incertezas e o tratamento estatístico para cálculo das incertezas dos resultados são discutidos e apresentados na seção 4.5.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 DOSIMETRIA NO EQUIPAMENTO DE RAIOS X

Primeiramente, para determinação da resposta energética do MIR 7026 para raios X filtrados, foi realizada uma dosimetria no equipamento de raios X para calibração da câmara monitora (CM) mod. 7816, utilizando como padrão a câmara de ionização (CP) mod. M32002, posicionada a 2,0 metros do tubo de raios X. A dosimetria, para cada qualidade de raios X, foi realizada de acordo com o procedimento descrito na seção 3.2.2.1.

O APÊNDICE 1 apresenta os dados da dosimetria, assim como o tratamento estatístico dos dados para que posteriormente sejam realizados os cálculos e as conclusões relativas as incertezas de medição. Observando os dados estatísticos referentes à razão da medida da taxa de leitura da CP e da taxa de leitura da CM, pode ser visto um desvio padrão da média relativo máximo (incerteza relativa) de 0,136 % na medida em 65 keV (qualidade N-80).

Os valores da razão da medida da taxa de leitura da CP e da taxa de leitura da CM, não necessitaram de correção para as condições ambientais de referência visto que é uma medida relativa, não sofrendo influência da pressão atmosférica e de temperatura, que manteve o mesmo valor nas câmaras durante as medidas.

A TAB. 4.1 mostra os resultados do fator de calibração da CP ( $F_{cp}$ ) e do fator de calibração da CM ( $F_{cm}$ ) que foram obtidos por meio das EQ. 3.2 e EQ. 3.3, respectivamente.

**TAB. 4.1** Fatores de calibração da câmara de ionização mod. M32002 (Fcp) e da câmara monitora mod. 7816 (Fcm).

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b>Fcp (Gy/C)</b>	<b>Fcm (Gy/ue)</b>
N-60 (48 keV)	$2,469 \times 10^4$	$1,007 \times 10^5$
N-80 (65 keV)	$2,459 \times 10^4$	$8,190 \times 10^4$
N-100 (83 keV)	$2,469 \times 10^4$	$6,820 \times 10^4$
N-120 (100 keV)	$2,487 \times 10^4$	$6,518 \times 10^4$
N-150 (118 keV)	$2,490 \times 10^4$	$7,115 \times 10^4$
N-200 (164 keV)	$2,500 \times 10^4$	$7,214 \times 10^4$
N-250 (208 keV)	$2,518 \times 10^4$	$6,619 \times 10^4$

#### 4.2 RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026 COM O DETECTOR GM INTERNO SEM O FILTRO DE COMPENSAÇÃO

Este ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos descritos nas seções 3.2.2.1 e 3.2.2.2. O APÊNDICE 2 apresenta os dados das medições para a obtenção da resposta energética do Monitor MIR 7026, com o detector GM interno sem filtro de compensação.

Para se obter a resposta energética foi necessário determinar, para cada qualidade de radiação X, a taxa verdadeira convencional de Kar, por meio da EQ. 3.4. Para radiação gama, as taxas verdadeiras convencionais de Kar foram obtidas por meio do método descrito na seção 3.2. Os valores da taxa verdadeira convencional de  $H^*(10)$  são obtidos por meio da EQ. 3.5. A TAB. 4.2 mostra os valores da taxa verdadeira convencional de Kar e  $H^*(10)$  obtidos neste ensaio.

**TAB. 4.2** Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e H\*(10).

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b>Taxa verdadeira de Kar (mGy/h)</b>	<b>Taxa verdadeira de H*(10) (mSv/h)</b>
N-60 (48 keV)	3,43	5,45
N-80 (65 keV)	1,16	2,00
N-100 (83 keV)	2,10	3,59
N-120 (100 keV)	0,70	1,15
N-150 (118 keV)	5,48	8,66
N-200 (164 keV)	10,90	15,91
N-250 (208 keV)	12,00	16,68
S-Cs (662 keV)	0,44	0,53
S-Co (1250 keV)	0,035	0,04

A TAB. 4.3 apresenta os valores de resposta energética para H\*(10), normalizados para o <sup>137</sup>Cs, do MIR 7026 com o detector GM interno sem o filtro de compensação e a FIG. 4.1 apresenta a curva obtida a partir dos dados apresentados na TAB. 4.3. Pode ser observado na FIG. 4.1, que a resposta vai aumentando com a diminuição da energia a partir de aproximadamente 662 keV e apresenta um valor máximo em 48 keV. Na energia de 1250 keV, a resposta é também maior que aquela apresentada na energia de 662 keV. Este comportamento está em concordância com a literatura (ICRP 47, 1992) e depende do número atômico e da espessura da parede do detector.

TAB. 4.3 Valores de resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno sem o filtro de compensação.

Qualidade da Radiação	Resposta norm. para o $^{137}\text{Cs}$
N-60 (48 keV)	5,35
N-80 (65 keV)	5,15
N-100 (83 keV)	4,94
N-120 (100 keV)	3,24
N-150 (118 keV)	3,37
N-200 (164 keV)	3,08
N-250 (208 keV)	1,36
S-Cs (662 keV)	1,00
S-Co (1250 keV)	1,29

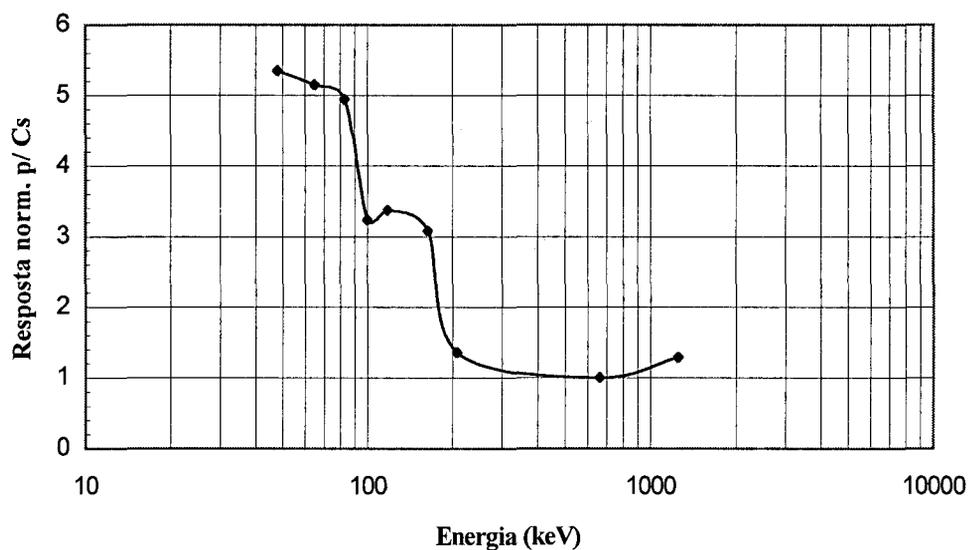


FIG. 4.1 Resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno sem o filtro de compensação.

### 4.3 RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026 COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTROS DE COMPENSAÇÃO

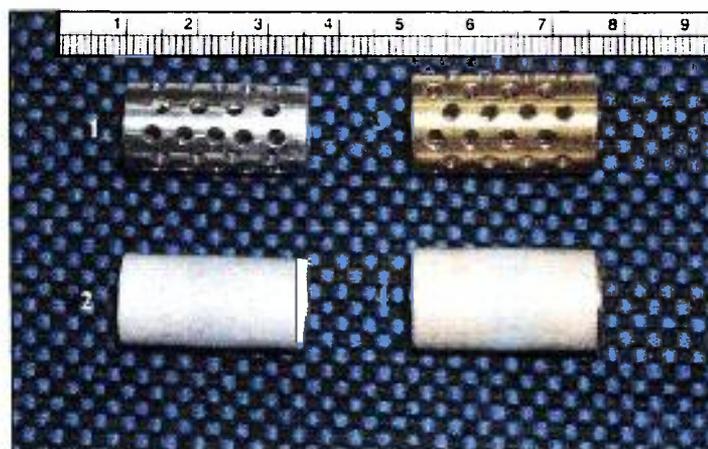
Este ensaio foi realizado, utilizando os filtros de compensação, de acordo com os procedimentos descritos nas seções 3.2.2.1 e 3.2.2.2. O APÊNDICE 3 apresenta a listagem do programa utilizado para o cálculo do filtro de compensação, que envolve o detector GM, para uniformizar a resposta energética na faixa de 48 keV a 1250 keV e satisfazer os requisitos da norma IEC 60846. Foram simulados filtros utilizando alumínio, chumbo e latão com várias combinações de espessura e porcentagens de área vazada. As simulações utilizando filtro de alumínio e chumbo, ambos com 0,10 cm de espessura, com 21 % de área vazada e filtro de chumbo com 0,08 cm de espessura e latão com 0,19 cm de espessura com 20 % de área vazada, proporcionaram as melhores correções na resposta energética. O APÊNDICE 4 apresenta o resultado da simulação desses filtros.

As porcentagens de área vazada nos filtros foram confeccionadas de duas maneiras de acordo com recomendações fornecidas pela literatura (TERRY, 1991) (BARCLAY, 1986) (ICRP 47, 1992): uma com distribuição uniforme de área vazada, por meio de furos concêntricos de mesmo raio (igualmente vazados) e outra com a porcentagem de área vazada concentrada no centro do filtro (espaço central). Todos os filtros cilíndricos apresentam um comprimento de 2,5 cm, necessária para cobrir toda a área sensível do detector GM. Para efeito de ilustração, o detector GM LND 713 utilizado no MIR 7026 e os filtros de compensação são mostrados nas FIG. 4.2 e 4.3, respectivamente.

Os APÊNDICES 5, 6, 7 e 8 apresentam as planilhas de dados das medições para obtenção da resposta energética do MIR 7026 utilizando cada um dos filtros. As TAB. 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 mostram os valores da taxa verdadeira convencional de Kar e  $H^*(10)$  e da média da leitura do MIR 7026, obtidos no ensaio com cada filtro. Observando as quatro tabelas, pode ser visto que o processo de medição apresentou uma boa reprodutibilidade, porém esta reprodutibilidade poderia ser ainda melhor se o controle de ajuste de alta-tensão do equipamento de raios X fosse mais exato.



**FIG. 4.2** Detector GM LND 713 que é utilizado no Monitor MIR 7026.



**FIG. 4.3** (1) Filtro de alumínio e chumbo com furos concêntricos (21 % de área vazada); (2) Filtro de alumínio e chumbo com espaço central (21 % de área vazada); (3) Filtro de latão e chumbo com furos concêntricos (20 % de área vazada); (4) Filtro de latão e chumbo com espaço central (20 % de área vazada).

**TAB. 4.4** Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e H\*(10) e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de alumínio e chumbo com furos concêntricos.

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b>Taxa verdadeira de Kar (mGy/h)</b>	<b>Taxa verdadeira de H*(10) (mSv/h)</b>	<b>Média da leitura MIR 7026 (mSv/h)</b>
N-60 (48 keV)	3,36	5,34	6,39
N-80 (65 keV)	1,08	1,87	2,66
N-100 (83 keV)	2,09	3,57	5,20
N-120 (100 keV)	0,63	1,03	1,25
N-150 (118 keV)	5,45	8,61	9,99
N-200 (164 keV)	10,91	15,93	17,72
N-250 (208 keV)	11,96	16,62	12,23
S-Cs (662 keV)	0,44	0,53	0,50
S-Co (1250 keV)	0,035	0,04	0,04

**TAB. 4.5** Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e H\*(10) e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de alumínio e chumbo com espaço central.

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b>Taxa verdadeira de Kar (mGy/h)</b>	<b>Taxa verdadeira de H*(10) (mSv/h)</b>	<b>Média da leitura MIR 7026 (mSv/h)</b>
N-60 (48 keV)	3,43	5,45	6,40
N-80 (65 keV)	1,10	1,90	2,72
N-100 (83 keV)	2,18	3,73	5,28
N-120 (100 keV)	0,64	1,05	1,23
N-150 (118 keV)	5,42	8,56	9,02
N-200 (164 keV)	10,78	15,74	15,26
N-250 (208 keV)	11,87	16,50	12,10
S-Cs (662 keV)	0,44	0,53	0,49
S-Co (1250 keV)	0,035	0,04	0,04

**TAB. 4.6** Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e H\*(10) ) e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de latão e chumbo com furos concêntricos.

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b>Taxa verdadeira de Kar (mGy/h)</b>	<b>Taxa verdadeira de H*(10) (mSv/h)</b>	<b>Média da leitura MIR 7026 (mSv/h)</b>
N-60 (48 keV)	3,41	5,42	4,91
N-80 (65 keV)	1,08	1,87	2,14
N-100 (83 keV)	2,10	3,59	4,39
N-120 (100 keV)	0,64	1,05	1,14
N-150 (118 keV)	5,36	8,47	9,30
N-200 (164 keV)	10,61	15,49	16,86
N-250 (208 keV)	12,01	16,69	12,90
S-Cs (662 keV)	0,44	0,53	0,49
S-Co (1250 keV)	0,035	0,04	0,04

**TAB. 4.7** Valores da taxa verdadeira convencional de Kar e H\*(10) e da média da leitura do MIR 7026, utilizando o filtro de latão e chumbo com espaço central.

<b>Qualidade da Radiação</b>	<b>Taxa verdadeira de Kar (mGy/h)</b>	<b>Taxa verdadeira de H*(10) (mSv/h)</b>	<b>Média da leitura MIR 7026 (mSv/h)</b>
N-60 (48 keV)	3,42	5,44	5,96
N-80 (65 keV)	1,09	1,89	2,48
N-100 (83 keV)	2,12	3,62	4,61
N-120 (100 keV)	0,63	1,03	1,04
N-150 (118 keV)	5,35	8,45	8,12
N-200 (164 keV)	10,50	15,33	14,28
N-250 (208 keV)	12,15	16,89	11,71
S-Cs (662 keV)	0,44	0,53	0,46
S-Co (1250 keV)	0,035	0,04	0,04

· As TAB. 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os valores de resposta energética para H\*(10), normalizados para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno, utilizando cada um dos filtros de compensação; e as FIG. 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as curvas obtidas a partir dos dados apresentados nas TAB. 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

Pode-se observar que o filtro de latão e chumbo com furos concêntricos (ver TAB 4.10 e FIG 4.6) proporcionou a melhor correção na resposta energética. Neste caso, a resposta energética compensada, normalizada para a resposta do  $^{137}\text{Cs}$ , apresentou um desvio máximo relativo de + 31% na faixa de 48 keV a 1250 keV.

TAB. 4.8 Valores de resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de alumínio e chumbo com furos concêntricos.

Qualidade da Radiação	Resposta norm. para o $^{137}\text{Cs}$
N-60 (48 keV)	1,26
N-80 (65 keV)	1,50
N-100 (83 keV)	1,55
N-120 (100 keV)	1,28
N-150 (118 keV)	1,23
N-200 (164 keV)	1,17
N-250 (208 keV)	0,78
S-Cs (662 keV)	1,00
S-Co (1250 keV)	1,16

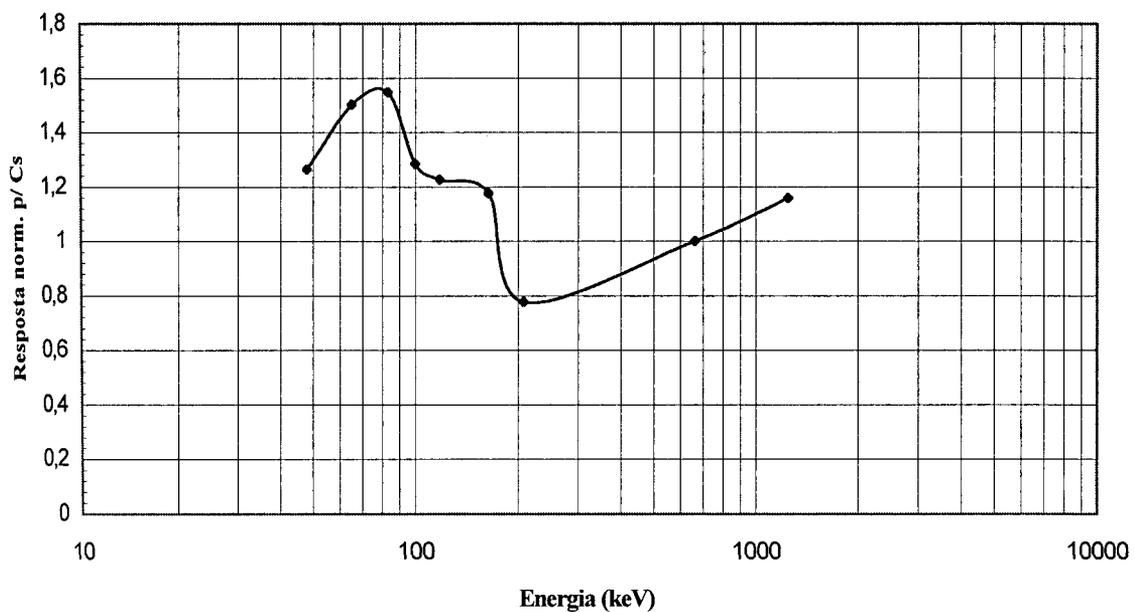
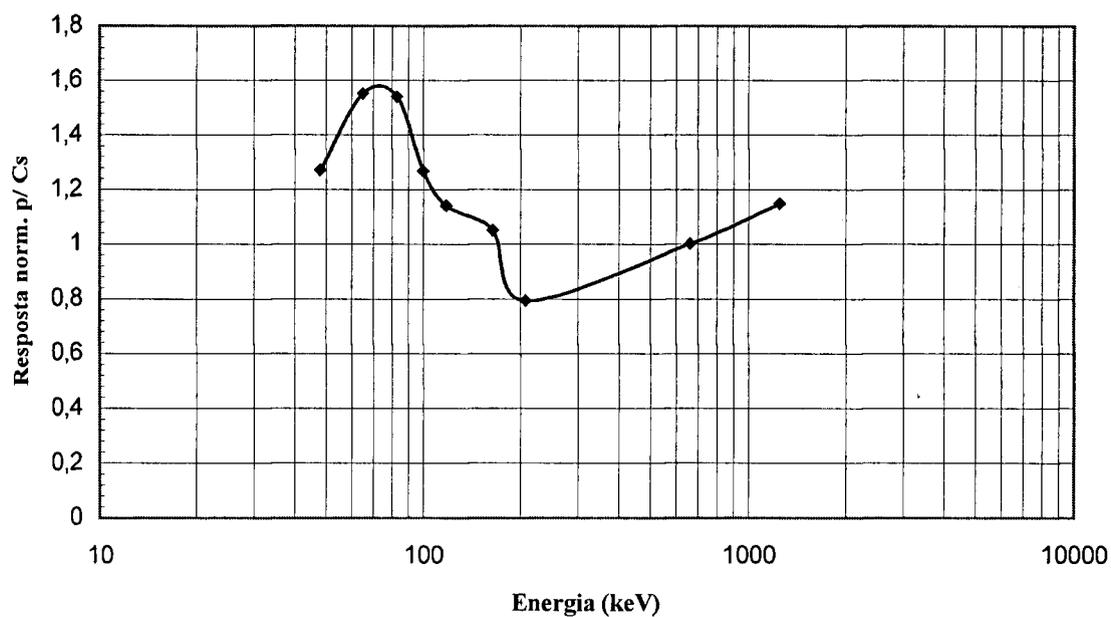


FIG. 4.4 Resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de alumínio e chumbo com furos concêntricos.

**TAB. 4.9** Valores de resposta energética para  $H^*(10)$ , normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de alumínio e chumbo com espaço central.

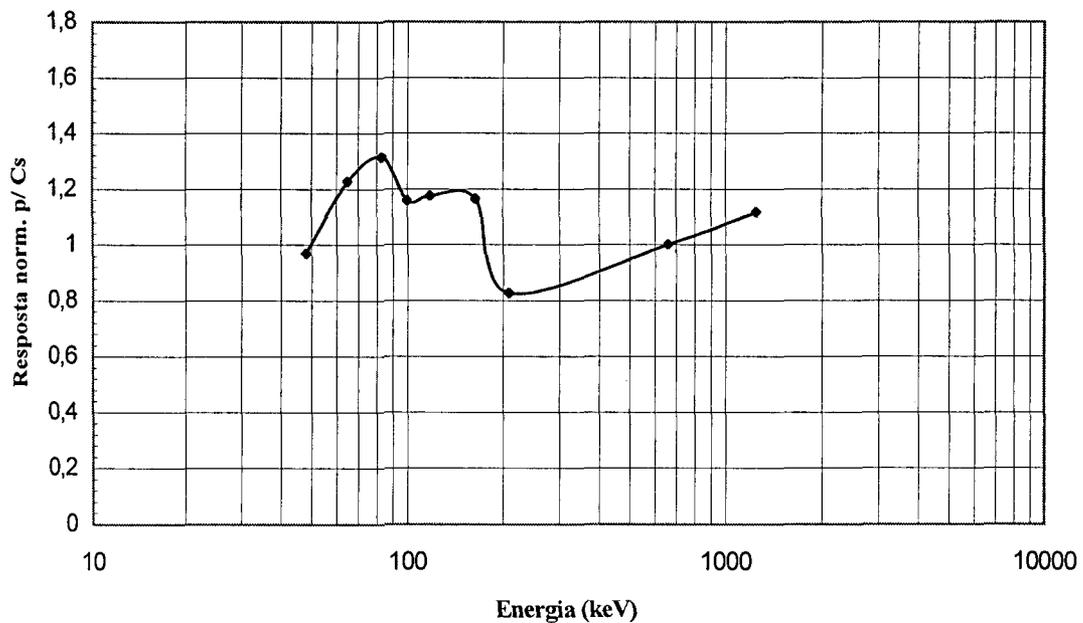
Qualidade da Radiação	Resposta norm. para o $^{137}\text{Cs}$
N-60 (48 keV)	1,27
N-80 (65 keV)	1,55
N-100 (83 keV)	1,54
N-120 (100 keV)	1,27
N-150 (118 keV)	1,14
N-200 (164 keV)	1,05
N-250 (208 keV)	0,79
S-Cs (662 keV)	1,00
S-Co (1250 keV)	1,15



**FIG. 4.5** Resposta energética para  $H^*(10)$ , normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de alumínio e chumbo com espaço central.

**TAB. 4.10** Valores de resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de latão e chumbo com furos concêntricos.

Qualidade da Radiação	Resposta norm. para o $^{137}\text{Cs}$
N-60 (48 keV)	0,97
N-80 (65 keV)	1,23
N-100 (83 keV)	1,31
N-120 (100 keV)	1,16
N-150 (118 keV)	1,17
N-200 (164 keV)	1,16
N-250 (208 keV)	0,83
S-Cs (662 keV)	1,00
S-Co (1250 keV)	1,12



**FIG. 4.6** Resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de latão e chumbo com furos concêntricos.

TAB. 4.11 Valores de resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de latão e chumbo com espaço central.

Qualidade da Radiação	Resposta norm. para o $^{137}\text{Cs}$
N-60 (48 keV)	1,24
N-80 (65 keV)	1,49
N-100 (83 keV)	1,44
N-120 (100 keV)	1,14
N-150 (118 keV)	1,09
N-200 (164 keV)	1,05
N-250 (208 keV)	0,78
S-Cs (662 keV)	1,00
S-Co (1250 keV)	1,21

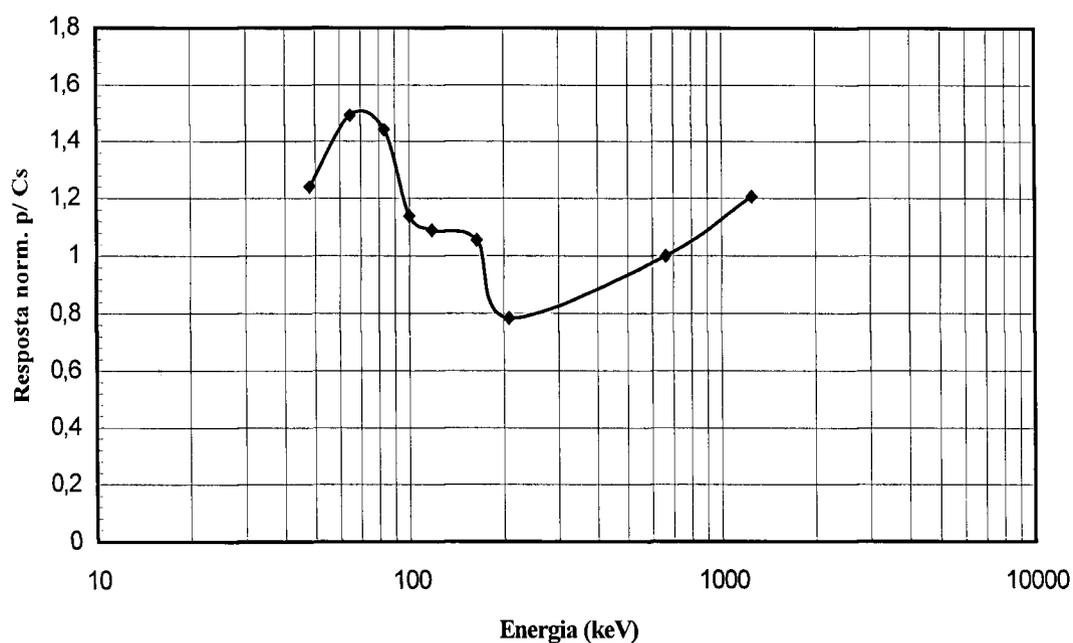


FIG. 4.7 Resposta energética para H\*(10), normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , do MIR 7026 com o detector GM interno com filtro de compensação de latão e chumbo com espaço central.

#### 4.4 RESPOSTA ANGULAR DO MONITOR MIR 7026 COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTRO DE COMPENSAÇÃO DE LATÃO E CHUMBO COM FUIROS CONCÊNTRICOS (20 % DE ÁREA VAZADA)

Este ensaio foi realizado, utilizando o filtro de compensação feito de latão e chumbo com furos concêntricos (20 % de área vazada), de acordo com o procedimento descrito na seção 3.2.3.

Para a avaliação da resposta angular foi utilizada a energia de 83 keV (N-100), que é a energia inicial da faixa exigida pela norma IEC 60846 e a energia que apresentou a menor resposta, que foi a de 208 keV (N-250). Considerando a direção de referência como ângulo de 0°, a resposta do MIR 7026 foi determinada para ângulos de incidência de 0° a ±90°, em dois planos perpendiculares (horizontal e vertical) contendo a direção de referência. O APÊNDICE 9 apresenta a planilha de dados das medições para obtenção da resposta angular do MIR 7026. Os valores da taxa verdadeira convencional de Kar e H\*(10) foram determinados.

A norma de referência IEC 60846 exige que a variação da resposta se mantenha dentro de ±40 % para a faixa de energia de 80 keV a 1,25 MeV e ângulo de incidência de 0 a ±45°, em relação a resposta para a radiação de referência produzida pelo <sup>137</sup>Cs com um ângulo de incidência de 0°.

As TAB 4.12 e 4.13 apresentam os valores obtidos de resposta angular, normalizada para a resposta do <sup>137</sup>Cs com um ângulo de incidência de 0°, para ângulos 0° a ± 90° referente aos planos horizontal e vertical e as FIG. 4.8 e 4.9 apresentam as curvas de resposta angular obtidas a partir dos dados apresentados nas TAB 4.12 e 4.13. Pode ser observado que a resposta do MIR 7026, com ângulos de incidência de 0 a ± 45°, apresentou um desvio máximo de + 36 % para a energia de 83 keV a + 40° (plano vertical) e de - 38 % para a energia de 208 keV a - 45° (plano vertical). Analisando a resposta do MIR 7026 para toda a faixa de ângulos de incidência, ou seja, de 0° a ± 90°, pode ser observado um desvio máximo de - 47 % para a energia de 83 keV a - 90° (plano vertical) e de + 47 % para a energia de 208 keV a + 90° (plano horizontal).

**TAB. 4.12** Valores de resposta angular do MIR 7026, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$  a  $0^\circ$ , referente ao plano horizontal para a energia de 83 keV (1) e para a energia de 208 keV (2).

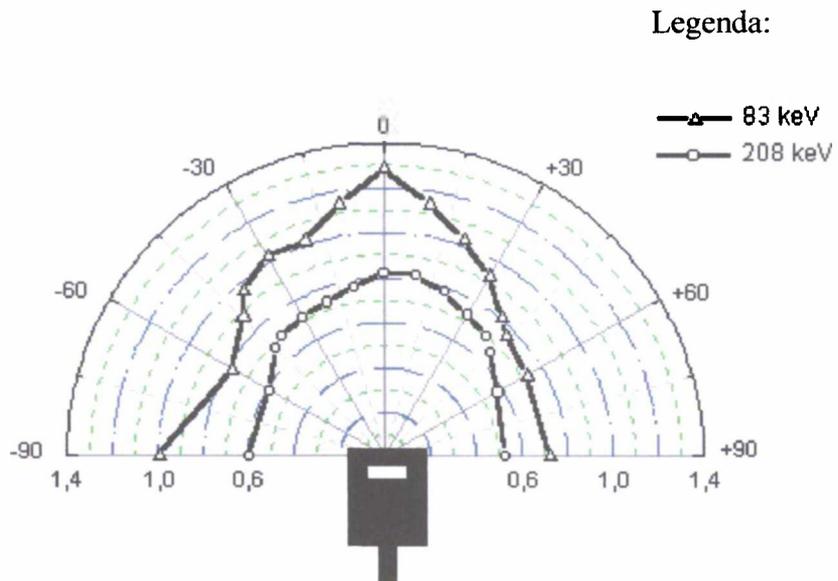
Direção	Resposta para 83 keV	(1)
- 90°	0,99	
- 60°	0,77	
- 45°	0,88	
- 40°	0,96	
- 30°	1,02	
- 20°	1,02	
- 10°	1,14	
0°	1,28	
+ 10°	1,14	
+ 20°	1,03	
+ 30°	0,93	
+ 40°	0,80	
+ 45°	0,76	
+ 60°	0,72	
+ 90°	0,73	
0° ( $^{137}\text{Cs}$ )	1,00	

Direção	Resposta para 208 keV	(2)
- 90°	0,60	
- 60°	0,58	
- 45°	0,68	
- 40°	0,70	
- 30°	0,72	
- 20°	0,73	
- 10°	0,77	
0°	0,81	
+ 10°	0,82	
+ 20°	0,78	
+ 30°	0,73	
+ 40°	0,70	
+ 45°	0,66	
+ 60°	0,57	
+ 90°	0,53	
0° ( $^{137}\text{Cs}$ )	1,00	

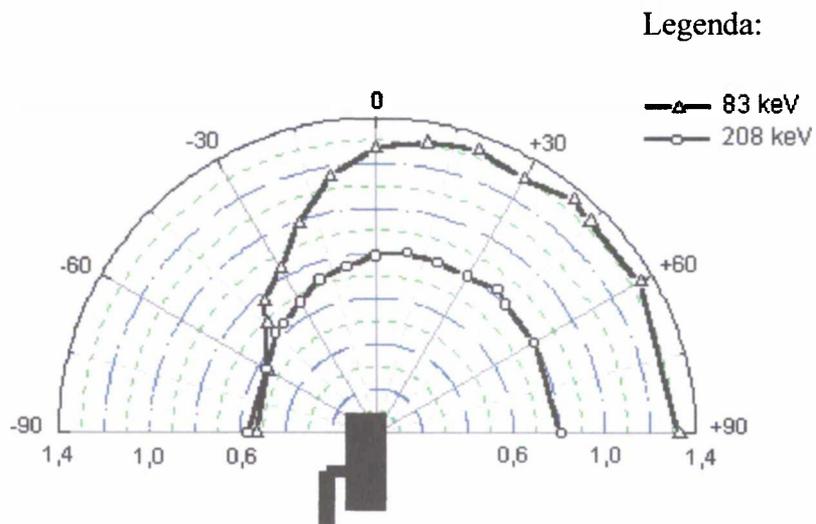
TAB. 4.13 Valores de resposta angular do MIR 7026, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$  a  $0^\circ$ , referente ao plano horizontal para a energia de 83 keV (1) e para a energia de 208 keV (2).

Direção	Resposta para 83 keV	(1)
- 90°	0,53	
- 60°	0,55	
- 45°	0,69	
- 40°	0,76	
- 30°	0,84	
- 20°	0,99	
- 10°	1,16	
0°	1,26	
+ 10°	1,31	
+ 20°	1,34	
+ 30°	1,30	
+ 40°	1,36	
+ 45°	1,33	
+ 60°	1,34	
+ 90°	1,33	
0° ( $^{137}\text{Cs}$ )	1,00	

Direção	Resposta para 208 keV	(2)
- 90°	0,56	
- 60°	0,56	
- 45°	0,62	
- 40°	0,63	
- 30°	0,66	
- 20°	0,72	
- 10°	0,74	
0°	0,79	
+ 10°	0,81	
+ 20°	0,80	
+ 30°	0,80	
+ 40°	0,83	
+ 45°	0,80	
+ 60°	0,80	
+ 90°	0,81	
0° ( $^{137}\text{Cs}$ )	1,00	



**FIG. 4.8** Resposta angular do MIR 7026, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$  a  $0^\circ$ , referente ao plano horizontal.



**FIG. 4.9** Resposta angular do MIR 7026, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$  a  $0^\circ$ , referente ao plano vertical.

#### 4.5 CÁLCULO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS MEDIÇÕES

O cálculo das incertezas associadas às medições, para determinação da resposta energética e angular do Monitor de Radiação MIR 7026, foi realizado a partir dos dados estatísticos (APÊNDICES 7.7 e 7.9) obtidos nas medidas (incertezas tipo A) com o filtro de compensação de latão e chumbo com furos concêntricos (20 % de área vazada) e das informações passadas pelo processo de medição ou de outras fontes de referência (incertezas tipo B). Todas essas incertezas foram avaliadas e calculadas de acordo com a metodologia apresentada no ANEXO 2.

As fontes de incertezas que contribuíram na determinação da resposta energética e angular do MIR 7026 neste trabalho estão listadas na TAB. 4.13, assim como outros parâmetros necessários para o cálculo da incerteza combinada e da expandida.

**TAB. 4.14** Planilha para cálculo das incertezas combinada e expandida.

Fonte de incerteza	Tipo	Distribuição de Probabilidade assumida	Graus de liberdade	Fator de abrangência (k)	Incerteza Máxima (%)	Incerteza Padrão (%)
Medições	A	normal	9	1	0,43	0,43
Fator de calibração da câmara padrão	B	normal	$\infty$	2	1,5	0,75
Coefficiente de conversão, $h*k$	B	normal	$\infty$	1	2	2
Tamanho e uniformidade do campo	B	retangular	$\infty$	$\sqrt{3}$	0,2	0,12
Medida de temperatura	B	retangular	$\infty$	$\sqrt{3}$	0,2	0,12
Medida de pressão	B	retangular	$\infty$	$\sqrt{3}$	0,2	0,12
Posicionamento	B	retangular	$\infty$	$\sqrt{3}$	1	0,58

A incerteza associada às medições é baseada no desvio padrão da média relativo máximo das medidas experimentais, tanto para raios X quanto para radiação gama. Este desvio apresentou um valor máximo na determinação da resposta energética, normalizada para o  $^{137}\text{Cs}$ , para o  $^{60}\text{Co}$ .

A incerteza no fator de calibração é baseada na incerteza do fator de calibração da câmara de ionização padrão, utilizada para as dosimetrias nos ensaios com raios X e radiação gama. Os dados de incerteza máxima, distribuição de probabilidade e fator de abrangência são fornecidos pelo certificado de calibração da câmara (Certificado de calibração 3875, PTB, 1999).

A incerteza no coeficiente de conversão é baseada na incerteza dos coeficientes de conversão,  $h^*k$ , de *kerma* no ar,  $K_{ar}$ , para equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ . Essa incerteza é declarada na norma de referência (ISO 4037-3, 1997), juntamente com a distribuição de probabilidade e o fator de abrangência assumidos.

A incerteza associada ao tamanho e uniformidade do campo de radiação gama é derivada do manual técnico, elaborado pelo LNMRI/IRD, para calibração de monitores de radiação (LNMRI, 2000). Como a distribuição de probabilidades associada a incerteza não foi fornecida pelo manual, foi utilizada a distribuição retangular, de acordo com a metodologia apresentada no ANEXO 2.

As medidas de temperatura e pressão foram realizadas com um termômetro e com um barômetro colocados próximos à câmara de ionização padrão no momento da dosimetria. As incertezas associadas aos indicadores desses instrumentos são derivadas, também, do manual técnico para calibração de monitores de radiação (LNMRI, 2000). Na falta de informação da distribuição de probabilidade associada as essas incertezas, foi utilizada a distribuição retangular.

A incerteza no posicionamento é baseada na lei do inverso do quadrado da distância (IAEA Safety Reports Series N<sup>o</sup>16, 2000). A medida da resposta energética para o  $^{60}\text{Co}$  foi feita a aproximadamente 1,0 m. O manual técnico para calibração de monitores de radiação (LNMRI, 2000) considera uma incerteza de 5,0 mm em 1,0 m. Foi assumida a distribuição retangular.

A incerteza combinada, calculada a partir dos dados apresentados na TAB. 4.13, foi de 2,3 %, e a incerteza expandida foi de 4,5 %, a um nível de confiança de 95 % ( $k_{95} = 1,96$ ), para a determinação da resposta energética e angular do MIR 7026, utilizando o filtro de

compensação de latão e chumbo com furos concêntricos (20 % de área vazada), em todas as qualidades de radiação utilizadas neste trabalho.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, em todos os ensaios recomendados, mostraram que o Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026 com o filtro de compensação desenvolvido, pode ser utilizado como um medidor de  $H^*(10)$ , em unidades de Sv/h, por atender os requisitos da norma IEC 60846. Estes ensaios apresentaram uma incerteza máxima de 4,5 % a um nível de confiança de 95 %. Essa incerteza está dentro da incerteza máxima recomendada na literatura que é de 20 % para todos os tipos de monitores de radiação, isto é, monitores com leitura analógica e com leitura digital (IEC 60846, 1999) (LNMRI, 2000). Cabe ressaltar que, a incerteza máxima de 4,5 % encontrada é semelhante a valores de incerteza encontrados na literatura (IAEA Safety Reports Series N°16, 2000), na calibração de instrumentos para  $H^*(10)$ .

Outros ensaios exigidos (ensaios elétricos, ambientais e outros) já haviam sido realizados no instrumento e se encontravam adequados.

A metodologia e os procedimentos de ensaios apresentados neste trabalho, proporcionaram resultados satisfatórios, desta forma eles podem ser aplicados para a avaliação das respostas energética e angular de monitores de radiação de área para a grandeza  $H^*(10)$ .

Quanto aos resultados da dosimetria de equipamento de raios X, observou-se uma incerteza relativa máxima de 0,136 %. Este resultado está dentro dos valores fornecidos pela literatura (IAEA Safety Reports Series N°16, 2000) e mostra que o processo de medição apresentou uma boa repetitividade.

O programa utilizado para cálculo dos filtros de compensação pode ser considerado um bom método para obtenção de filtros de compensação para  $H^*(10)$ , pois além de fornecer filtros adequados para a correção da resposta energética, eliminou desperdícios de tempo, material e mão de obra. As diferenças apresentadas entre as respostas simuladas e as medidas para cada filtro construído, provavelmente originam-se de alguns fatores, tais como pureza

dos materiais e ao posicionamento do filtro no detector, mas não afetaram significativamente os resultados.

O filtro de compensação escolhido proporcionou um desvio máximo relativo de + 31% na resposta energética em 83 keV. Este resultado é satisfatório e semelhante aos dados de resposta compensada para  $H^*(10)$  fornecidos pela literatura (TERRY, 1991).

O desvio de - 38 % apresentado na determinação da resposta angular referente ao plano vertical, para a energia de 208 keV a - 45°, apesar de atender a norma, mostra que o conector de sonda externa do MIR 7026, posicionado sobre o detector GM, influenciou na resposta.

Quanto ao resultado final da incerteza máxima, outras fontes de incertezas não consideradas podem ter contribuído nos procedimentos de medida, tais como:

- ♦ Desconhecimento da pureza exata dos materiais utilizados na confecção dos filtros;
- ♦ Posicionamento dos filtros no detector GM.

Por fim, pelo que foi discutido e mostrado, conclui-se que o Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026 é o primeiro monitor de radiação com tecnologia nacional, qualificado segundo normas internacionais, para medir  $H^*(10)$ .

## 5.2 SUGESTÕES

Objetivando melhorar a resposta angular referente ao plano vertical para a energia de 208 keV a - 45°, que apresentou um desvio de - 38 %, sugere-se a mudança de posição do conector de sonda externa do MIR 7026, que fica localizado na direção do feixe a - 45° do detector GM.

Uma vez que o equipamento de raios X utilizado neste trabalho somente fornece campos de radiações X filtradas de referência na faixa de 48 keV (N-60) a 208 keV (N-250), fica como sugestão para trabalhos futuros, a realização dos ensaios com campos de 8 keV (N-10), 12 keV (N-15), 16 keV (N-20), 24 keV (N-30), 33 keV (N-40) e de 250 keV (N-300), visando verificar o comportamento da resposta energética e angular para toda a faixa de radiações X filtradas da série de espectro estreito.

O programa utilizado requer que se entre com os parâmetros do filtro. Este programa poderia ser melhorado para funcionar a partir das especificações finais desejadas, dando as características de fabricação do filtro como resposta.

Com o objetivo de complementar e aperfeiçoar este trabalho, sugere-se também, a aplicação da metodologia e dos procedimentos, elaborados para a determinação da resposta energética e angular, nas sondas externas utilizadas no MIR 7026 para raios X e gama.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTIX, Frank H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. USA: A Wiley-Interscience publication, 1986.

BARCLAY, D. **Improved Response of Geiger-Muller Detectors**. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 33, n. 1, february 1986.

BÖHM, J., ALBERTS, W. G. et al. **ISO Recommended Reference Radiations for the Calibration and Proficiency Testing of Dosimeters and Dose Rate Meters Used in Radiation Protection**. Radiation Protection Dosimetry, v. 86, n. 2, p. 87-105, 1999.

BURGESS, P. H. **Current and Future Instrument Designs for monitoring Photon Radiation in terms of Ambient and Directional Dose Equivalent**. Radiation Protection Dosimetry, v. 12, n. 2, p. 211-214, 1985.

Certificado de Calibração n. 3875. PTB – Braunschweig und Berlin, september, 1999.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Radioproteção**, CNEN-NE-3.01. Rio de Janeiro: 1988.

FERRARI, A., PELLICIONI, M. **On the ambient dose equivalent**. J. Radiol. Prot., v. 14, n. 4, p. 331-335, 1994.

INMETRO. **Guia para expressão da incerteza de medição**. 2ª ed. BRASIL, agosto, 1998.

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR - IEN. **Manual de Serviço do Monitor Inteligente de Radiação MIR 7026**. Rio de Janeiro, 1995. 22 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Safety Reports Series n. 16: Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments**. Viena: IAEA, 2000.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS – ICRU. **Quantities and Units**. Report 19 (ICRU 19). USA: 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, 1971.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS – ICRU. **Radiation Quantities and Units**. Report 33 (ICRU 33). USA: 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, 1980.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS – ICRU. **Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources**. Report 39 (ICRU 39). USA: 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, 1985.

- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS – ICRU. **The Quality Factor in Radiation Protection**. Report 40 (ICRU 40). USA: 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, 1986.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS – ICRU. **Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, Part 2**. Report 43 (ICRU 43). USA: 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, 1988.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS – ICRU. **Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry**. Report 51 (ICRU 51). USA: 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, 1993.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION – ICRP. **Recommendations of the ICRP**. Publication 26 (ICRP 26), Annals of the ICRP 1, n. 3. USA: Pergamon Press, 1977.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION – ICRP. **Recommendations of the ICRP**. Publication 60 (ICRP 60), Annals of the ICRP 21, n. 1-3. USA: Pergamon Press, 1991.
- 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.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosimeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy – Part 1: Radiation Characteristics and Production Methods**. International Standard ISO 4037-1. Geneva: ISO, 1996.
- INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosimeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy – Part 2: Dosimetry for Radiation Proctetion over the Energy Ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV**. Final Draft International Standard ISO/FDIS 4037-2. Geneva: ISO, 1997.
- INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosimeters and Doserate Meters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy – Part 3: Calibration of Area and Personal Dosimeters and the Measurement of their Response as a Function of Energy and Angle of Incidence**. Final Draft International Standard ISO/FDIS 4037-3. Geneva: ISO, 1997.
- KRAMER, H. M., BÖHM, J. et al. **On the Current Status of an ISO Working Document on the Calibration and Type Testing of Radiation Protection Dosimeters for Photons**. Radiation Protection Dosimetry, v. 54, n. 3-4, p. 267-272, 1994.

LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES – LNMRI. **Manual da Qualidade para Laboratório: Calibração de Monitores de Radiação de Área.** Rio de Janeiro, 2000. 12 p.

MATTSSON, S., ALMÉN, A. **Practical Impact of the Evolution and Changes of ICRP Recommendations on Radiological Protection in Medicine.** Radiation Protection Dosimetry, v. 57, n. 1-4, p. 79-84, 1995.

OLIVEIRA, M. V. Projeto de Filtros para Detectores Geiger-Müller. In: II ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 25-29 Outubro, 1993, Caxambu.

RAMOS, M. M. O. Type Testing Evaluation of Brazilian Survey Meters. In: WORLD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, V CONGRESSO BRASILEIRO DE FÍSICOS EM MEDICINA, 21-26 Agosto, 1994, Rio de Janeiro.

RAMOS, M. M. O. **Grandezas e Unidades Radiológicas. Parte II.** Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2000a.

RAMOS, M. M. O. **O que muda na monitoração de área com a introdução das grandezas operacionais da ICRU para radiação de fótons.** Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2000b.

SIEMENS. **Technical Note R80.0758.13.04.01.** Germain, 1965. 15 p.

TAUHATA, Luiz, SALATI, Ivan P. A. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 1999. p. 85, 165.

TERRY, J. C. **Measurement of ambient dose equivalent using Geiger-Muller tubes.** Occupational Radiation Protection, paper 43, p. 211-212, 1991.

THOMPSON, I. M. G. International Standard Reference Radiations and their Application to the Type Testing of Dosimetric Apparatus. In: NATIONAL AND INTERNATIONAL STANDARDIZATION OF RADIATION DOSIMETRY, 1978, Viena: IAEA.

## 7. APÊNDICES

7.1 APÊNDICE 1: PLANILHA DE DADOS DA DOSIMETRIA REALIZADA NO EQUIPAMENTO DE RX PARA CALIBRAÇÃO DA CÂMARA MONITORA MOD. 7816 UTILIZANDO COMO PADRÃO A CÂMARA DE IONIZAÇÃO MOD. M32002.

#### Qualidade N-60 (48 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,22	1,104E-09	4,503E-09	9,183E-12	3,746E-11	4,079
120,34	1,090E-09	4,445E-09	9,058E-12	3,694E-11	4,078
120,33	1,082E-09	4,418E-09	8,992E-12	3,672E-11	4,083
120,32	1,133E-09	4,619E-09	9,417E-12	3,839E-11	4,077
120,43	1,131E-09	4,602E-09	9,391E-12	3,821E-11	4,069
				<b>Média</b>	4,077
				<b>Desvio padrão</b>	0,005
				<b>Desv. pad. média</b>	0,002
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,057

#### Qualidade N-80 (65 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,44	4,590E-10	1,524E-09	3,811E-12	1,265E-11	3,320
120,36	4,560E-10	1,525E-09	3,789E-12	1,267E-11	3,344
120,47	4,540E-10	1,508E-09	3,769E-12	1,252E-11	3,322
120,36	4,490E-10	1,498E-09	3,730E-12	1,245E-11	3,336
120,36	4,450E-10	1,482E-09	3,697E-12	1,231E-11	3,330
				<b>Média</b>	3,331
				<b>Desvio padrão</b>	0,010
				<b>Desv. pad. média</b>	0,005
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,136

#### Qualidade N-100 (83 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,56	9,910E-10	2,733E-09	8,220E-12	2,267E-11	2,758
120,49	9,690E-10	2,673E-09	8,042E-12	2,218E-11	2,759
120,43	9,600E-10	2,653E-09	7,971E-12	2,203E-11	2,764
120,43	9,570E-10	2,643E-09	7,947E-12	2,195E-11	2,762
120,45	9,530E-10	2,637E-09	7,912E-12	2,189E-11	2,767
				<b>Média</b>	2,762
				<b>Desvio padrão</b>	0,004
				<b>Desv. pad. média</b>	0,002
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,061

### Qualidade N-120 (100 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,37	3,350E-10	8,780E-10	2,783E-12	7,294E-12	2,621
120,51	3,340E-10	8,720E-10	2,772E-12	7,236E-12	2,611
120,46	3,300E-10	8,670E-10	2,739E-12	7,197E-12	2,627
119,59	3,270E-10	8,590E-10	2,734E-12	7,183E-12	2,627
120,45	3,300E-10	8,640E-10	2,740E-12	7,173E-12	2,618
				<b>Média</b>	2,621
				<b>Desvio padrão</b>	0,007
				<b>Desv. pad. média</b>	0,003
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,117

### Qualidade N-150 (118 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,49	2,550E-09	7,295E-09	2,116E-11	6,054E-11	2,861
120,48	2,553E-09	7,290E-09	2,119E-11	6,051E-11	2,855
120,65	2,552E-09	7,289E-09	2,115E-11	6,041E-11	2,856
120,47	2,545E-09	7,270E-09	2,113E-11	6,035E-11	2,857
120,85	2,537E-09	7,258E-09	2,099E-11	6,006E-11	2,861
				<b>Média</b>	2,858
				<b>Desvio padrão</b>	0,003
				<b>Desv. pad. média</b>	0,001
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,041

### Qualidade N-200 (164 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,50	4,816E-09	1,389E-08	3,997E-11	1,152E-10	2,883
120,43	4,843E-09	1,397E-08	4,021E-11	1,160E-10	2,884
120,49	4,850E-09	1,400E-08	4,025E-11	1,162E-10	2,887
120,41	4,851E-09	1,402E-08	4,029E-11	1,164E-10	2,890
120,44	4,847E-09	1,398E-08	4,024E-11	1,161E-10	2,884
				<b>Média</b>	2,886
				<b>Desvio padrão</b>	0,003
				<b>Desv. pad. média</b>	0,001
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,042

### Qualidade N-250 (208 keV)

Tempo (s)	Leitura CM (ue)	Leitura CP (C)	Taxa de Leitura CM (ue/s)	Taxa de Leitura CP (C/s)	Taxa CP/Taxa CM (C/ue)
120,42	6,026E-09	1,587E-08	5,004E-11	1,318E-10	2,633
120,51	6,029E-09	1,586E-08	5,003E-11	1,316E-10	2,631
120,41	6,003E-09	1,577E-08	4,985E-11	1,310E-10	2,627
120,66	6,035E-09	1,585E-08	5,002E-11	1,313E-10	2,626
120,54	6,020E-09	1,581E-08	4,994E-11	1,312E-10	2,626
				<b>Média</b>	2,629
				<b>Desvio padrão</b>	0,003
				<b>Desv. pad. média</b>	0,001
				<b>Desv. pad. média (%)</b>	0,052

7.2. APÊNDICE 2: PLANILHA DE DADOS DAS MEDIÇÕES PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026, COM O DETECTOR GM INTERNO SEM FILTRO DE COMPENSAÇÃO.

**Qualidade N-60 (48 keV)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (R/h)	
59,27	5,620E-10	19,87	101,30	9,482E-12	2,59	
59,46	5,620E-10			9,452E-12	2,58	
59,38	5,620E-10			9,464E-12	2,58	
59,61	5,620E-10			9,428E-12	2,58	
59,69	5,620E-10	20,48	101,35	9,415E-12	2,59	
Médias		20,175	101,325	9,448E-12	2,60	Média 2,59
Desvio padrão				2,699E-14	2,60	Desvio padrão 0,008
Desv. pad. média				1,207E-14	2,60	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,128	2,59	Desv. pad. média(%) 0,100
Média da taxa corrigida p/ T,P				9,454E-12		
F(T,P)	1,000597					

**Qualidade N-80 (65 keV)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mR/h)	
59,36	2,340E-10	19,92	101,35	3,942E-12	916	
59,31	2,335E-10			3,937E-12	914	
59,79	2,345E-10			3,922E-12	917	
59,66	2,320E-10			3,889E-12	915	
59,64	2,340E-10	19,93	101,30	3,924E-12	914	
Médias		19,925	101,325	3,923E-12	912	Média 914,9
Desvio padrão				2,082E-14	915	Desvio padrão 1,370
Desv. pad. média				9,312E-15	915	Desv. pad. média 0,433
Desv. pad. média (%)				0,237	916	Desv. pad. média(%) 0,047
Média da taxa corrigida p/ T,P				3,922E-12		
F(T,P)	0,999744					

### Qualidade N-100 (83 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (R/h)	
59,54	5,100E-10	20,43	101,35	8,566E-12	1,57	
59,92	5,140E-10			8,578E-12	1,57	
59,99	5,130E-10			8,551E-12	1,57	
59,47	5,050E-10			8,492E-12	1,56	
59,48	5,080E-10	20,23	101,35	8,541E-12	1,56	
					1,56	
Médias		20,33	101,35	8,546E-12	1,57	Média 1,569
Desvio padrão				3,326E-14	1,57	Desvio padrão 0,007
Desv. pad. média				1,487E-14	1,58	Desv. pad. média 0,002
Desv. pad. média (%)				0,174	1,58	Desv. pad. média(%) 0,149
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,555E-12		
F(T,P)	1,001126					

### Qualidade N-120 (100 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mR/h)	
59,66	1,780E-10	19,90	101,35	2,984E-12	331	
59,73	1,790E-10			2,997E-12	331	
59,71	1,780E-10			2,981E-12	330	
59,63	1,770E-10			2,968E-12	331	
59,76	1,780E-10	20,55	101,30	2,979E-12	332	
					331	
Médias		20,225	101,325	2,982E-12	329	Média 330,2
Desvio padrão				1,027E-14	329	Desvio padrão 1,135
Desv. pad. média				4,592E-15	329	Desv. pad. média 0,359
Desv. pad. média (%)				0,154	329	Desv. pad. média(%) 0,109
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,984E-12		
F(T,P)	1,000768					

### Qualidade N-150 (118 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (R/h)	
59,55	1,283E-09	20,19	101,30	2,154E-11	2,59	
59,93	1,285E-09			2,144E-11	2,59	
59,64	1,273E-09			2,134E-11	2,59	
59,37	1,265E-09			2,131E-11	2,59	
59,53	1,270E-09	19,83	101,35	2,133E-11	2,59	
					2,59	
Médias		20,01	101,325	2,139E-11	2,60	Média 2,593
Desvio padrão				9,831E-14	2,59	Desvio padrão 0,005
Desv. pad. média				4,397E-14	2,60	Desv. pad. média 0,002
Desv. pad. média (%)				0,206	2,60	Desv. pad. média(%) 0,059
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,140E-11		
F(T,P)	1,000034					

### Qualidade N-200 (164 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (R/h)		
59,43	2,480E-09	19,72	101,35	4,173E-11	4,34		
59,47	2,487E-09			4,182E-11	4,34		
59,33	2,488E-09			4,193E-11	4,35		
59,35	2,499E-09			4,211E-11	4,35		
59,37	2,499E-09	20,71	101,30	4,209E-11	4,36		
					4,36		
Médias		20,215	101,325	4,194E-11	4,35	Média	4,35
Desvio padrão				1,654E-13	4,35	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				7,396E-14	4,35	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,176	4,35	Desv. pad. média(%)	0,048
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,197E-11			
F(T,P)	1,000733						

### Qualidade N-250 (208 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (R/h)		
59,47	2,990E-09	20,40	101,30	5,028E-11	2,02		
59,64	3,009E-09			5,045E-11	2,01		
59,61	3,003E-09			5,038E-11	2,01		
59,41	2,994E-09			5,040E-11	2,01		
59,77	3,002E-09	19,93	101,35	5,023E-11	2,01		
					2,01		
Médias		20,165	101,325	5,035E-11	2,01	Média	2,01
Desvio padrão				9,215E-14	2,01	Desvio padrão	0,005
Desv. pad. média				4,121E-14	2,00	Desv. pad. média	0,001
Desv. pad. média (%)				0,082	2,01	Desv. pad. média(%)	0,074
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,037E-11			
F(T,P)	1,000563						

### Qualidade S-Cs (<sup>137</sup>Cs, 662 keV)

Taxa de kerma no ar	440 µGy/h	Medições no MIR (mR/h)
		46,8
		46,7
		46,7
		46,6
		46,7
		46,8
Média	46,74	46,7
Desvio padrão	0,117	46,8
Desv. pad. média	0,037	46,6
Desv. pad. média (%)	0,079	47,0

### Qualidade S-Co ( $^{60}\text{Co}$ , 1250 keV)

Taxa de kerma no ar		Medições no MIR (mR/h)
35 $\mu\text{Gy/h}$		4,71
		4,77
		4,62
		4,55
		4,65
		4,52
Média	4,641	4,64
Desvio padrão	0,075	4,71
Desv. pad. média	0,024	4,64
Desv. pad. média (%)	0,514	4,60

### 7.3 APÊNDICE 3: LISTAGEM DO PROGRAMA UTILIZADO PARA O CÁLCULO DO FILTRO DE COMPENSAÇÃO DO DETECTOR GEIGER MÜLLER DO MONITOR MIR 7026.

```
/*programa calculo da resposta otimizada do detector GM*/
/*blindagem concentrica e mesmo percentual de buracos*/

#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "conio.h"
#include "math.h"
#include <dos.h>
//#include <graphics.h>

/* inicializacoes */

void iniciadados(void);
void graf(void);
void material(void);
void parede(void);
void buraco(void);
void calcula(void);
void normaliza(void);
void imprime(void);
void detector(void);
//int driver=1,mode=1;
float dados[2176],dados1[2176],pico=0;
float espmin,espmax,brcmin,brcmax,transm[9][5],
    q1,l1,l,resp[9],respotima[9],resp1[9],erro,erromin,
    e1,e2,b1,b2,m,m1,incr1,incr2;
int mat[5],eng,num,n,n1,ma1,ma2,a,b;
float transmissao(int nt,float mt);
char ch;
float densidade[3]={2.7,11.34,8.89};
int energia[9]={48,65,83,100,118,164,208,662,1250};
char str[3][9]={"aluminio","chumbo","latao"};
float fator[9][3]={
.4066,8.928,3.064,
.258,4.245,1.392,
.19635,2.8815,.7221,
.17,5.78,462,
.15848,4.4444,.37596,
.13352,1.77432,.20452,
.12056,.96536,.1534,
.074893,.113647,.073007,
.05565,.0613,.05345,
};
float det[9]={5.350,5.143,4.918,3.237,3.371,3.077,1.355,1.000,1.2850};

/*programa principal*/
void main()
{
clrscr();
erromin=100;
clrscr();
```

```

printf("Este programa calcula a resposta do detector blindado\n");
printf("com buracos concentricos e iguais\n");
/*detector()*/
material();
parede();
buraco();
clrscr();
calcula();
normaliza();
// saida();
imprime();
}

/*Resposta do detector nu*/
void detector(void)
{
for(eng=0;eng<9;eng++)
{
clrscr();
printf("Entre com a resposta para a energia de %Si KeV:",energia[eng]);
scanf("%f",&det[eng]);
}
}
/*escolha do material*/
void material(void)
{
clrscr();
eng=0;
do
{
printf("Entre com o material desejado?\n");
printf("0 - aluminio 1 - chumbo 2 - latao 3 - sair\n");
do
{
ch = toupper(getch());
}
while(ch!='0'&& ch!='1' && ch!='2'); // || ch!='3');
switch(ch)
{
case '0':mat[eng] = 0;break;
case '1':mat[eng] = 1;break;
case '2':mat[eng] = 2;break;
return;
//case '3':return;
}
num=eng;
eng++;
//clrscr();
}
while(eng<2);
}
/*escolha da espessura da parede*/
void parede(void)
{
clrscr();
do
{
printf("Entre com a espessura minima da parede de cada material em cm?\n");
scanf("%f",&espmin);
}
}

```

```

    clrscr();
}
while(espmin<0.009999);
do
{
    printf("Entre com a espessura maxima da parede de cada material em cm?\n");
    scanf("%f",&espmax);
    clrscr();
}
while(espmax<espmin);
do
{
    printf("Entre com o incremento na espessura da parede de cada material em cm?\n");
    scanf("%f",&incr1);
}
while(incr1<=0);
}

/*escolha do percentual de buracos*/
void buraco(void)
{
    clrscr();
    do
    {
        printf("Entre com o percentual minimo de buracos (0 a 100)?\n");
        scanf("%f",&brcmin);
        clrscr();
    }
    while(brcmin>100 || brcmin<0);
    do
    {
        printf("Entre com o percentual maximo de buracos (0 a 100)?\n");
        scanf("%f",&brcmax);
        clrscr();
    }
    while(brcmax>100 || brcmax<brcmin);
    do
    {
        printf("Entre com o incr. no perc. de buracos (maior ou igual a 1)?\n");
        scanf("%f",&incr2);
        clrscr();
    }
    while(incr2<1);
}
/*Calcula a blindagem otima*/
void calcula(void)
{
    for(n=0;n<=num;n++)
    {
        for(m=espmin;m<=espmax;m+=incr1)
        {
            for(l=brcmin;l<=brcmax;l+=incr2)
            {
                for(n1=0;n1<=num;n1++)
                {
                    for(m1=espmin;m1<=espmax;m1+=incr1)
                    {
                        l1=l;
                        if(n1<n)continue;

```



```

    det[eng]/=q1;
  }
}
/*Imprime os dados*/
void imprime(void)
{
printf(" Material parede furos      parede(cm)      furos(%)  erromin\n");
printf("      (cm) (%)  min max incr min max incr ");
printf("%f\n",erromin);
printf("%10s %5.2f %5.1f %5.2f %5.2f %5.2f %5.1f %5.1f %5.1f\n",
      str[mat[ma1]],e1,b1,espmín,espmáx,incr1,brcmín,brcmáx,incr2);
printf("%10s %5.2f %5.1f\n",str[mat[ma2]],e2,b2);
printf("\n");
printf("Energia(KeV)  Detector nu  Detector c/ blindagem concentrica\n");
for(eng=0;eng<8;eng++)
  {
printf("%5i      %6.3f      %6.3f\n",energia[eng],
det[eng],resp[eng]);
  }
printf("%5i      %6.3f      %6.3f\n",
energia[8],det[8],resp[8]);
do
  {
ch=toupper(getch());
  }
while(ch!=27);
}
void iniciadados(void)
{
int posi;
// int cont;
for(eng=0;eng<8;eng++)
  {
a=((log10(energia[eng])-1)*1000);
b=((log10(energia[eng+1])-1)*1000);
for(posi=a;posi<b;posi++)
  {
dados[posi]=((resp[eng+1]-resp[eng])/(b-a))
*(posi-a)+resp[eng];
dadosl[posi]=((det[eng+1]-det[eng])/(b-a))
*(posi-a)+det[eng];
if(dados[posi]>pico)pico=dados[posi];
if(dadosl[posi]>pico)pico=dadosl[posi];
  }
}
}
}

```

7.4. APÊNDICE 4: RESULTADO DA SIMULAÇÃO DOS FILTROS ESCOLHIDOS PARA SEREM UTILIZADOS NO DETECTOR GM DO MONITOR MIR 7026.

---

Material	parede		parede(cm)			área vazada(%)		
	(cm)	(%)	min	max	incr	min	max	incr
alumínio	0,10	21,0	0,10	0,40	0,05	0,0	100,0	1,0
chumbo	0,10	21,0						

Energia(keV)	Detector nu	Detector com blindagem concêntrica
48	5,350	1,262
65	5,153	1,247
83	4,938	1,317
100	3,237	0,767
118	3,371	0,813
164	3,077	1,078
208	1,355	0,709
662	1,000	1,000
1250	1,285	1,350

---

Material	parede		parede(cm)			área vazada(%)		
	(cm)	(%)	min	max	incr	min	max	incr
chumbo	0,08	20,0	0,01	0,20	0,01	0,0	100,0	1,0
latao	0,19	20,0						

Energia(keV)	Detector nu	Detector com blindagem concêntrica
48	5,350	1,277
65	5,153	1,238
83	4,938	1,275
100	3,237	0,780
118	3,371	0,835
164	3,077	1,150
208	1,355	0,739
662	1,000	1,000
1250	1,285	1,367

---

7.5 APÊNDICE 5: PLANILHA DE DADOS DAS MEDIÇÕES PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026, COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTRO DE COMPENSAÇÃO DE ALUMÍNIO E CHUMBO COM FUROS CONCÊNTRICOS.

**Qualidade N-60 (48 keV)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,38	5,550E-10	20,29	101,76	9,3466E-12	6,38	
59,44	5,550E-10			9,3371E-12	6,40	
59,93	5,580E-10			9,3109E-12	6,40	
59,87	5,570E-10			9,3035E-12	6,41	
59,60	5,520E-10	19,81	101,75	9,2617E-12	6,42	
					6,40	
Médias		20,05	101,755	9,312E-12	6,39	Média 6,391
Desvio padrão				3,327E-14	6,37	Desvio padrão 0,018
Desv. pad. média				1,488E-14	6,37	Desv. pad. média 0,006
Desv. pad. média (%)				0,160	6,37	Desv. pad. média(%) 0,089
Média da taxa corrigida p/ T,P				9,274E-12		
F(T,P)	0,995944					

**Qualidade N-80 (65 keV)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,64	2,220E-10	19,73	101,75	3,722E-12	2,66	
59,48	2,210E-10			3,716E-12	2,67	
60,03	2,220E-10			3,698E-12	2,67	
59,64	2,190E-10			3,672E-12	2,68	
59,87	2,200E-10	19,56	101,75	3,675E-12	2,66	
					2,66	
Médias		19,645	101,75	3,697E-12	2,66	Média 2,665
Desvio padrão				2,296E-14	2,66	Desvio padrão 0,007
Desv. pad. média				1,027E-14	2,67	Desv. pad. média 0,002
Desv. pad. média (%)				0,278	2,66	Desv. pad. média(%) 0,084
Média da taxa corrigida p/ T,P				3,677E-12		
F(T,P)	0,994617					



### Qualidade N-200 (164 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,47	2,491E-09	19,99	101,70	4,189E-11	17,8		
59,50	2,503E-09			4,207E-11	17,7		
59,58	2,519E-09			4,228E-11	17,7		
59,66	2,525E-09			4,232E-11	17,7		
59,39	2,514E-09	19,76	101,69	4,233E-11	17,7		
					17,7		
Médias		19,875	101,695	4,218E-11	17,7	Média	17,72
Desvio padrão				1,947E-13	17,7	Desvio padrão	0,042
Desv. pad. média				8,709E-14	17,8	Desv. pad. média	0,013
Desv. pad. média (%)				0,206	17,7	Desv. pad. média(%)	0,075
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,201E-11			
F(T,P)	0,995937						

### Qualidade N-250 (208 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,36	3,000E-09	20,17	101,69	5,054E-11	12,3		
59,87	3,020E-09			5,044E-11	12,3		
59,34	2,985E-09			5,030E-11	12,3		
59,42	2,983E-09			5,020E-11	12,2		
59,42	2,983E-09	20,32	101,69	5,020E-11	12,2		
					12,2		
Médias		20,245	101,69	5,034E-11	12,2	Média	12,23
Desvio padrão				1,497E-13	12,2	Desvio padrão	0,048
Desv. pad. média				6,693E-14	12,2	Desv. pad. média	0,015
Desv. pad. média (%)				0,133	12,2	Desv. pad. média(%)	0,125
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,020E-11			
F(T,P)	0,997243						

### Qualidade S-Cs (<sup>137</sup>Cs, 662 keV)

Taxa de kerma no ar	Medições no MIR (uSv/h)	
440 µGy/h	502	
	500	
	503	
	500	
	497	
	492	
Média	497,5	494
Desvio padrão	3,598	495
Desv. pad. média	1,138	496
Desv. pad. média (%)	0,229	496

### Qualidade S-Co ( $^{60}\text{Co}$ , 1250 keV)

Taxa de kerma no ar		Medições no MIR (uSv/h)
35 $\mu\text{Gy/h}$		45,6
		44,3
		43,4
		43,9
		44,5
		45,2
Média	44,56	44,9
Desvio padrão	0,715	43,8
Desv. pad. média	0,226	44,7
Desv. pad. média (%)	0,508	45,3

7.6 APÊNDICE 6: PLANILHA DE DADOS DAS MEDIÇÕES PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026, COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTRO DE COMPENSAÇÃO DE ALUMÍNIO E CHUMBO COM ESPAÇO CENTRAL .

**Qualidade N-60 (48 keV)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,49	5,610E-10	19,72	101,26	9,430E-12	6,40	
59,37	5,600E-10			9,432E-12	6,41	
59,34	5,630E-10			9,488E-12	6,41	
59,38	5,630E-10			9,481E-12	6,40	
59,50	5,620E-10	19,73	101,22	9,445E-12	6,39	
					6,41	
Médias		19,725	101,24	9,455E-12	6,40	Média 6,40
Desvio padrão				2,730E-14	6,40	Desvio padrão 0,009
Desv. pad. média				1,221E-14	6,38	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,129	6,40	Desv. pad. média(%) 0,047
Média da taxa corrigida p/ T,P				9,454E-12		
F(T,P)	0,999901					

**Qualidade N-80 (65 keV)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,57	2,210E-10	20,20	101,21	3,710E-12	2,70	
59,65	2,210E-10			3,705E-12	2,71	
59,52	2,220E-10			3,730E-12	2,72	
59,87	2,210E-10			3,691E-12	2,72	
59,59	2,200E-10	20,85	101,19	3,692E-12	2,72	
					2,72	
Médias		20,525	101,20	3,706E-12	2,72	Média 2,716
Desvio padrão				1,580E-14	2,71	Desvio padrão 0,007
Desv. pad. média				7,064E-15	2,72	Desv. pad. média 0,002
Desv. pad. média (%)				0,191	2,72	Desv. pad. média(%) 0,081
Média da taxa corrigida p/ T,P				3,717E-12		
F(T,P)	1,003028					

### Qualidade N-100 (83 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,37	5,260E-10	19,96	101,19	8,860E-12	5,30	
59,43	5,260E-10			8,851E-12	5,30	
59,19	5,260E-10			8,887E-12	5,30	
59,59	5,270E-10			8,844E-12	5,30	
59,60	5,280E-10	20,68	101,18	8,859E-12	5,28	
					5,27	
Médias		20,32	101,185	8,860E-12	5,28	Média 5,282
Desvio padrão				1,628E-14	5,25	Desvio padrão 0,018
Desv. pad. média				7,279E-15	5,27	Desv. pad. média 0,006
Desv. pad. média (%)				0,082	5,27	Desv. pad. média(%) 0,105
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,882E-12		
F(T,P)	1,002477					

### Qualidade N-120 (100 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,69	1,640E-10	20,39	101,18	2,748E-12	1,24	
59,37	1,620E-10			2,729E-12	1,24	
59,37	1,600E-10			2,695E-12	1,24	
59,48	1,630E-10			2,740E-12	1,24	
59,45	1,630E-10	19,68	101,18	2,742E-12	1,23	
					1,23	
Médias		20,035	101,18	2,731E-12	1,23	Média 1,231
Desvio padrão				2,111E-14	1,22	Desvio padrão 0,009
Desv. pad. média				9,440E-15	1,22	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,346	1,22	Desv. pad. média(%) 0,225
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,735E-12		
F(T,P)	1,001553					

### Qualidade N-150 (118 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,41	1,258E-09	20,42	101,18	2,117E-11	9,01	
59,40	1,251E-09			2,106E-11	9,00	
59,40	1,245E-09			2,096E-11	9,01	
59,53	1,249E-09			2,098E-11	9,03	
59,37	1,263E-09	20,56	101,17	2,127E-11	9,02	
					9,02	
Médias		20,49	101,175	2,109E-11	9,04	Média 9,021
Desvio padrão				1,328E-13	9,03	Desvio padrão 0,012
Desv. pad. média				5,940E-14	9,02	Desv. pad. média 0,004
Desv. pad. média (%)				0,282	9,03	Desv. pad. média(%) 0,042
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,116E-11		
F(T,P)	1,003157					

### Qualidade N-200 (164 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,48	2,452E-09	19,80	101,17	4,122E-11	15,3		
59,84	2,477E-09			4,139E-11	15,3		
59,48	2,468E-09			4,149E-11	15,3		
59,90	2,493E-09			4,162E-11	15,3		
59,43	2,472E-09	20,14	101,16	4,160E-11	15,3		
					15,2		
Médias		19,97	101,165	4,147E-11	15,3	Média	15,26
Desvio padrão				1,618E-13	15,2	Desvio padrão	0,052
Desv. pad. média				7,237E-14	15,2	Desv. pad. média	0,016
Desv. pad. média (%)				0,175	15,2	Desv. pad. média(%)	0,107
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,153E-11			
F(T,P)	1,001479						

### Qualidade N-250 (208 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,73	2,986E-09	20,97	101,16	4,999E-11	12,1		
59,31	2,960E-09			4,991E-11	12,1		
59,97	2,980E-09			4,969E-11	12,1		
59,66	2,922E-09			4,898E-11	12,1		
59,89	2,983E-09	20,02	101,16	4,981E-11	12,1		
					12,1		
Médias		20,495	101,16	4,968E-11	12,1	Média	12,1
Desvio padrão				4,058E-13	12,1	Desvio padrão	0
Desv. pad. média				1,815E-13	12,1	Desv. pad. média	0
Desv. pad. média (%)				0,365	12,1	Desv. pad. média(%)	0
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,984E-11			
F(T,P)	1,003322						

### Qualidade S-Cs (<sup>137</sup>Cs, 662 keV)

Taxa de kerma no ar	Medições no MIR (uSv/h)	
440 µGy/h	486	
	487	
	485	
	487	
	482	
	483	
Média	485,6	489
Desvio padrão	2,119	486
Desv. pad. média	0,670	487
Desv. pad. média (%)	0,138	484

### Qualidade S-Co ( $^{60}\text{Co}$ , 1250 keV)

Taxa de kerma no ar		Medições no MIR (uSv/h)	
35 $\mu\text{Gy/h}$		43,6	
		44,6	
		43,6	
		42,8	
		42,9	
		43,5	
Média	43,11	42,2	
Desvio padrão	0,714	42,8	
Desv. pad. média	0,226	42,4	
Desv. pad. média (%)	0,524	42,7	

7.7 APÊNDICE 7: PLANILHA DE DADOS DAS MEDIÇÕES PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026, COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTRO DE COMPENSAÇÃO DE LATÃO E CHUMBO COM FUROS CONCÊNTRICOS.

### Qualidade N-60 (48 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,43	5,610E-10	20,63	101,26	9,440E-12	4,93	
59,63	5,600E-10			9,391E-12	4,92	
59,55	5,580E-10			9,370E-12	4,91	
59,53	5,600E-10			9,407E-12	4,9	
59,69	5,600E-10	20,09	101,26	9,382E-12	4,91	
					4,91	
Médias		20,360	101,260	9,398E-12	4,91	Média 4,915
Desvio padrão				2,690E-14	4,93	Desvio padrão 0,010
Desv. pad. média				1,203E-14	4,91	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,128	4,92	Desv. pad. média(%) 0,063
Média da taxa corrigida p/ T,P				9,416E-12		
F(T,P)	1,001871					

### Qualidade N-80 (65 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,63	2,190E-10	19,75	101,23	3,673E-12	2,15	
59,46	2,170E-10			3,650E-12	2,13	
59,58	2,180E-10			3,659E-12	2,13	
59,59	2,180E-10			3,658E-12	2,13	
59,73	2,180E-10	20,11	101,25	3,650E-12	2,13	
					2,14	
Médias		19,93	101,24	3,658E-12	2,14	Média 2,14
Desvio padrão				9,426E-15	2,15	Desvio padrão 0,009
Desv. pad. média				4,216E-15	2,15	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,115	2,15	Desv. pad. média(%) 0,139
Média da taxa corrigida p/ T,P				3,660E-12		
F(T,P)	1,000601					

### Qualidade N-100 (83 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
60,04	5,110E-10	19,87	101,26	8,511E-12	4,39	
59,47	5,080E-10			8,542E-12	4,39	
59,38	5,100E-10			8,589E-12	4,38	
59,67	5,100E-10			8,547E-12	4,38	
59,70	5,100E-10	20,71	101,31	8,543E-12	4,41	
					4,40	
Médias		20,29	101,285	8,546E-12	4,40	Média 4,395
Desvio padrão				2,775E-14	4,41	Desvio padrão 0,011
Desv. pad. média				1,241E-14	4,39	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,145	4,40	Desv. pad. média(%) 0,078
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,558E-12		
F(T,P)				1,001385		

### Qualidade N-120 (100 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,03	1,620E-10	19,99	101,30	2,744E-12	1,15	
59,44	1,640E-10			2,759E-12	1,16	
59,28	1,620E-10			2,733E-12	1,15	
59,42	1,630E-10			2,743E-12	1,15	
59,49	1,630E-10	20,26	101,30	2,740E-12	1,14	
					1,13	
Médias		20,125	101,30	2,744E-12	1,13	Média 1,144
Desvio padrão				9,620E-15	1,13	Desvio padrão 0,011
Desv. pad. média				4,302E-15	1,15	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,157	1,15	Desv. pad. média(%) 0,297
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,746E-12		
F(T,P)				1,000673		

### Qualidade N-150 (118 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,54	1,247E-09	20,65	101,27	2,094E-11	9,28	
59,33	1,242E-09			2,093E-11	9,30	
59,17	1,238E-09			2,092E-11	9,30	
59,47	1,244E-09			2,092E-11	9,30	
59,49	1,240E-09	19,79	101,26	2,084E-11	9,31	
					9,31	
Médias		20,22	101,265	2,091E-11	9,32	Média 9,302
Desvio padrão				3,965E-14	9,30	Desvio padrão 0,010
Desv. pad. média				1,773E-14	9,30	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,085	9,30	Desv. pad. média(%) 0,035
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,094E-11		
F(T,P)				1,001343		

### Qualidade N-200 (164 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,61	2,419E-09	20,05	101,25	4,058E-11	16,8	
59,66	2,428E-09			4,070E-11	16,8	
59,89	2,442E-09			4,077E-11	16,7	
59,54	2,436E-09			4,091E-11	16,9	
59,47	2,432E-09	20,68	101,24	4,089E-11	16,9	
					16,9	
Médias		20,365	101,245	4,077E-11	16,9	Média 16,86
Desvio padrão				1,391E-13	16,9	Desvio padrão 0,070
Desv. pad. média				6,220E-14	16,9	Desv. pad. média 0,022
Desv. pad. média (%)				0,153	16,9	Desv. pad. média(%) 0,131
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,086E-11		
F(T,P)	1,002036					

### Qualidade N-250 (208 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,52	2,995E-09	19,82	101,23	5,032E-11	12,8	
59,69	2,987E-09			5,004E-11	12,8	
59,73	2,994E-09			5,013E-11	12,9	
59,58	3,021E-09			5,070E-11	12,9	
59,71	3,026E-09	20,01	101,21	5,068E-11	12,9	
					12,9	
Médias		19,915	101,22	5,037E-11	12,9	Média 12,9
Desvio padrão				3,071E-13	13,0	Desvio padrão 0,067
Desv. pad. média				1,373E-13	13,0	Desv. pad. média 0,021
Desv. pad. média (%)				0,273	12,9	Desv. pad. média(%) 0,163
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,041E-11		
F(T,P)	1,000747					

### Qualidade S-Cs (<sup>137</sup>Cs, 662 keV)

Taxa de kerma no ar	Medições no MIR (uSv/h)	
440 µGy/h	489	
	487	
	489	
	494	
	494	
	495	
Média	491,5	493
Desvio padrão	2,677	493
Desv. pad. média	0,847	491
Desv. pad. média (%)	0,172	490

## Qualidade S-Co ( $^{60}\text{Co}$ , 1250 keV)

Taxa de kerma no ar		Medições no MIR (uSv/h)
35 $\mu\text{Gy/h}$		42,6
		42,9
		42,2
		43,1
		42,5
		42,0
Média	42,44	41,6
Desvio padrão	0,519	41,8
Desv. pad. média	0,164	42,7
Desv. pad. média (%)	0,387	43,0

7.8 APÊNDICE 8: PLANILHA DE DADOS DAS MEDIÇÕES PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA ENERGÉTICA DO MONITOR MIR 7026, COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTRO DE COMPENSAÇÃO DE LATÃO E CHUMBO COM ESPAÇO CENTRAL .

### Qualidade N-60 (48 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,44	5,610E-10	20,20	101,08	9,438E-12	5,97		
59,51	5,610E-10			9,427E-12	5,96		
59,69	5,620E-10			9,415E-12	5,96		
59,49	5,600E-10			9,413E-12	5,97		
59,79	5,630E-10	19,94	101,07	9,416E-12	5,96		
					5,95		
Médias		20,07	101,075	9,422E-12	5,95	Média	5,959
Desvio padrão				1,044E-14	5,95	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				4,669E-15	5,96	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,050	5,96	Desv. pad. média(%)	0,039
Média da taxa corrigida p/ T,P				9,448E-12			
F(T,P)	1,002713						

### Qualidade N-80 (65 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,53	2,200E-10	19,75	101,07	3,696E-12	2,48		
59,53	2,200E-10			3,696E-12	2,49		
59,77	2,200E-10			3,681E-12	2,48		
60,91	2,220E-10			3,645E-12	2,48		
59,28	2,170E-10	20,60	101,05	3,661E-12	2,48		
					2,47		
Médias		20,175	101,06	3,675E-12	2,48	Média	2,477
Desvio padrão				2,240E-14	2,47	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				1,002E-14	2,47	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,273	2,47	Desv. pad. média(%)	0,086
Média da taxa corrigida p/ T,P				3,687E-12			
F(T,P)	1,003221						

### Qualidade N-100 (83 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,43	5,140E-10	19,87	101,04	8,649E-12	4,62	
59,50	5,130E-10			8,622E-12	4,61	
59,37	5,100E-10			8,590E-12	4,60	
59,26	5,120E-10			8,640E-12	4,60	
59,60	5,150E-10			20,71	101,05	8,641E-12
					4,61	
Médias		20,29	101,045	8,628E-12	4,61	Média 4,606
Desvio padrão				2,350E-14	4,61	Desvio padrão 0,008
Desv. pad. média				1,051E-14	4,59	Desv. pad. média 0,003
Desv. pad. média (%)				0,122	4,61	Desv. pad. média(%) 0,058
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,661E-12		
F(T,P)	1,003763					

### Qualidade N-120 (100 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,43	1,600E-10	20,31	101,03	2,692E-12	1,04	
59,66	1,610E-10			2,699E-12	1,04	
59,47	1,590E-10			2,674E-12	1,04	
59,50	1,590E-10			2,672E-12	1,04	
59,70	1,600E-10			20,64	101,02	2,680E-12
					1,05	
Médias		20,475	101,025	2,683E-12	1,04	Média 1,043
Desvio padrão				1,163E-14	1,05	Desvio padrão 0,005
Desv. pad. média				5,200E-15	1,05	Desv. pad. média 0,002
Desv. pad. média (%)				0,194	1,04	Desv. pad. média(%) 0,146
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,696E-12		
F(T,P)	1,004595					

### Qualidade N-150 (118 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,49	1,243E-09	19,90	101,01	2,089E-11	8,15	
59,46	1,238E-09			2,082E-11	8,15	
59,75	1,241E-09			2,077E-11	8,14	
59,52	1,235E-09			2,075E-11	8,13	
59,70	1,240E-09			20,33	101,02	2,077E-11
					8,10	
Médias		20,115	101,015	2,080E-11	8,11	Média 8,123
Desvio padrão				5,843E-14	8,11	Desvio padrão 0,018
Desv. pad. média				2,613E-14	8,11	Desv. pad. média 0,006
Desv. pad. média (%)				0,126	8,12	Desv. pad. média(%) 0,071
Média da taxa corrigida p/ T,P				2,087E-11		
F(T,P)	1,003462					

### Qualidade N-200 (164 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,58	2,391E-09	20,27	101,03	4,013E-11	14,3	
59,97	2,416E-09			4,029E-11	14,3	
59,59	2,404E-09			4,034E-11	14,3	
59,67	2,411E-09			4,041E-11	14,3	
59,54	2,409E-09	19,84	101,04	4,046E-11	14,3	
					14,3	
Médias		20,055	101,035	4,033E-11	14,2	Média 14,28
Desvio padrão				1,267E-13	14,3	Desvio padrão 0,042
Desv. pad. média				5,665E-14	14,2	Desv. pad. média 0,013
Desv. pad. média (%)				0,140	14,3	Desv. pad. média(%) 0,093
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,0448E-11		
F(T,P)	1,003058					

### Qualidade N-250 (208 keV)

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
60,14	3,073E-09	19,99	101,03	5,110E-11	11,7	
59,90	3,023E-09			5,047E-11	11,7	
59,50	3,017E-09			5,071E-11	11,7	
60,13	3,069E-09			5,104E-11	11,7	
59,59	3,030E-09	20,38	101,02	5,085E-11	11,7	
					11,7	
Médias		20,185	101,025	5,0832E-11	11,7	Média 11,71
Desvio padrão				2,562E-13	11,7	Desvio padrão 0,032
Desv. pad. média				1,146E-13	11,8	Desv. pad. média 0,010
Desv. pad. média (%)				0,225	11,7	Desv. pad. média(%) 0,085
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,101E-11		
F(T,P)	1,003603					

### Qualidade S-Cs (<sup>137</sup>Cs, 662 keV)

Taxa de kerma no ar 440 µGy/h	Medições no MIR (uSv/h)
	464
	465
	463
	467
	465
	465
	465
Média	464,1
Desvio padrão	1,663
Desv. pad. média	0,526
Desv. pad. média (%)	0,113

## Qualidade S-Co ( $^{60}\text{Co}$ , 1250 keV)

Taxa de kerma no ar		Medições no MIR (uSv/h)
35 $\mu\text{Gy/h}$		44,1
		42,8
		43,0
		44,7
		43,2
		43,3
Média	43,3	43,3
Desvio padrão	0,896	41,8
Desv. pad. média	0,283	42,4
Desv. pad. média (%)	0,654	44,4

7.9 APÊNDICE 9: PLANILHA DE DADOS DAS MEDIÇÕES PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA ANGULAR DO MONITOR MIR 7026, COM O DETECTOR GM INTERNO COM FILTRO DE COMPENSAÇÃO DE LATÃO E CHUMBO COM FUROS CONCÊNTRICOS .

**Qualidade N-100 (83 keV) (0° – plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,73	5,070E-10	19,75	102,10	8,488E-12	4,22		
59,77	5,070E-10			8,483E-12	4,22		
59,94	5,120E-10			8,542E-12	4,21		
60,16	5,110E-10			8,494E-12	4,22		
59,69	5,070E-10	19,69	102,09	8,494E-12	4,23		
					4,21		
Médias		19,720	102,095	8,500E-12	4,22	Média	4,217
Desvio padrão				2,383E-14	4,21	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				1,066E-14	4,21	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,125	4,22	Desv. pad. média(%)	0,051
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,428E-12			
F(T,P)	0,991510						

**Qualidade N-250 (208 keV) (0° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,42	3,014E-09	19,63	101,95	5,072E-11	12,7		
59,43	3,010E-09			5,065E-11	12,7		
59,78	3,023E-09			5,057E-11	12,7		
59,49	3,004E-09			5,050E-11	12,7		
59,59	3,007E-09	19,84	101,95	5,046E-11	12,7		
					12,6		
Médias		19,735	101,95	5,058E-11	12,6	Média	12,67
Desvio padrão				1,078E-13	12,6	Desvio padrão	0,048
Desv. pad. média				4,821E-14	12,7	Desv. pad. média	0,015
Desv. pad. média (%)				0,095	12,7	Desv. pad. média(%)	0,121
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,022E-11			
F(T,P)	0,992971						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+10° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,46	5,050E-10	19,64	101,95	8,493E-12	3,76	
60,05	5,100E-10			8,493E-12	3,77	
59,89	5,090E-10			8,499E-12	3,76	
59,87	5,070E-10			8,468E-12	3,76	
59,83	5,070E-10	20,53	101,95	8,474E-12	3,76	
					3,77	
<b>Médias</b>		20,085	101,95	8,485E-12	3,75	<b>Média</b> 3,759
<b>Desvio padrão</b>				1,341E-14	3,75	<b>Desvio padrão</b> 0,007
<b>Desv. pad. média</b>				5,996E-15	3,75	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,071	3,76	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,062
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,436E-12		
<b>F(T,P)</b>		0,994158				

**Qualidade N-250 (208 keV) (+10° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,57	2,995E-09	20,68	102,11	5,028E-11	12,7	
59,79	3,022E-09			5,054E-11	12,7	
59,59	3,008E-09			5,048E-11	12,7	
59,59	2,996E-09			5,028E-11	12,6	
59,76	3,000E-09	19,85	102,10	5,020E-11	12,7	
					12,7	
<b>Médias</b>		20,265	102,105	5,036E-11	12,7	<b>Média</b> 12,69
<b>Desvio padrão</b>				1,472E-13	12,7	<b>Desvio padrão</b> 0,032
<b>Desv. pad. média</b>				6,585E-14	12,7	<b>Desv. pad. média</b> 0,010
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,131	12,7	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,079
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,002E-11		
<b>F(T,P)</b>		0,993258				

**Qualidade N-100 (83 keV) (+20° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,57	5,060E-10	19,38	102,12	8,494E-12	3,40	
59,52	5,080E-10			8,535E-12	3,40	
59,73	5,110E-10			8,555E-12	3,39	
59,58	5,080E-10			8,526E-12	3,40	
59,54	5,090E-10	19,59	102,12	8,549E-12	3,39	
					3,40	
<b>Médias</b>		19,485	102,12	8,532E-12	3,40	<b>Média</b> 3,395
<b>Desvio padrão</b>				2,393E-14	3,40	<b>Desvio padrão</b> 0,007
<b>Desv. pad. média</b>				1,070E-14	3,38	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,125	3,39	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,066
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,451E-12		
<b>F(T,P)</b>		0,990472				

**Qualidade N-250 (208 keV) (+20° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (R/h)		
59,6	2,960E-09	19,93	102,12	4,966E-11	11,8		
59,75	2,958E-09			4,951E-11	11,8		
59,73	2,955E-09			4,947E-11	11,9		
59,83	2,955E-09			4,939E-11	11,9		
59,82	2,957E-09	19,68	102,11	4,943E-11	11,9		
					11,9		
Médias		19,805	102,115	4,949E-11	11,9	Média	11,88
Desvio padrão				1,053E-13	11,9	Desvio padrão	0,042
Desv. pad. média				4,710E-14	11,9	Desv. pad. média	0,013
Desv. pad. média (%)				0,095	11,9	Desv. pad. média(%)	0,112
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,908E-11			
F(T,P)	0,991604						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+30° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
60,06	5,120E-10	19,51	102,08	8,525E-12	3,05		
59,91	5,120E-10			8,546E-12	3,05		
59,79	5,100E-10			8,530E-12	3,06		
59,89	5,100E-10			8,516E-12	3,06		
59,71	5,090E-10	19,88	102,07	8,525E-12	3,06		
					3,08		
Médias		19,695	102,075	8,528E-12	3,08	Média	3,066
Desvio padrão				1,127E-14	3,08	Desvio padrão	0,012
Desv. pad. média				5,042E-15	3,07	Desv. pad. média	0,004
Desv. pad. média (%)				0,059	3,07	Desv. pad. média(%)	0,121
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,457E-12			
F(T,P)	0,99162						

**Qualidade N-250 (208 keV) (+30° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
60,17	3,030E-09	20,77	102,07	5,036E-11	11,2		
59,71	2,996E-09			5,018E-11	11,4		
59,63	2,995E-09			5,023E-11	11,3		
60,07	3,022E-09			5,031E-11	11,3		
59,80	3,013E-09	19,63	102,06	5,038E-11	11,3		
					11,3		
Médias		20,2	102,065	5,029E-11	11,3	Média	11,30
Desvio padrão				8,787E-14	11,3	Desvio padrão	0,047
Desv. pad. média				3,930E-14	11,3	Desv. pad. média	0,015
Desv. pad. média (%)				0,078	11,3	Desv. pad. média(%)	0,132
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,996E-11			
F(T,P)	0,993427						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+40° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,80	5,110E-10	19,43	102,04	8,545E-12	2,67		
59,60	5,100E-10			8,557E-12	2,66		
59,34	5,080E-10			8,561E-12	2,66		
59,77	5,100E-10			8,533E-12	2,66		
59,81	5,110E-10	19,53	102,02	8,544E-12	2,67		
					2,67		
Médias		19,48	102,03	8,548E-12	2,66	Média	2,666
Desvio padrão				1,126E-14	2,67	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				5,034E-15	2,66	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,059	2,68	Desv. pad. média(%)	0,083
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,474E-12			
F(T,P)	0,991329						

**Qualidade N-250 (208 keV) (+40° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,70	2,989E-09	19,52	102,01	5,007E-11	10,7		
59,77	3,004E-09			5,026E-11	10,7		
59,99	2,995E-09			4,992E-11	10,7		
59,80	2,988E-09			4,997E-11	10,7		
59,76	3,002E-09	20,32	102,01	5,023E-11	10,7		
					10,8		
Médias		19,92	102,01	5,009E-11	10,8	Média	10,75
Desvio padrão				1,521E-13	10,8	Desvio padrão	0,053
Desv. pad. média				6,800E-14	10,8	Desv. pad. média	0,017
Desv. pad. média (%)				0,136	10,8	Desv. pad. média(%)	0,155
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,974E-11			
F(T,P)	0,993014						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+45° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,51	5,060E-10	19,91	101,80	8,503E-12	2,48		
59,68	5,050E-10			8,462E-12	2,49		
60,20	5,060E-10			8,405E-12	2,48		
59,67	5,090E-10			8,530E-12	2,48		
59,40	5,080E-10	19,72	101,79	8,552E-12	2,49		
					2,50		
Médias		19,815	101,795	8,490E-12	2,51	Média	2,493
Desvio padrão				5,834E-14	2,50	Desvio padrão	0,011
Desv. pad. média				2,609E-14	2,50	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,307	2,50	Desv. pad. média(%)	0,134
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,446E-12			
F(T,P)	0,994755						

**Qualidade N-250 (208 keV) (+45° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,66	3,007E-09	19,89	101,79	5,040E-11	10,1		
59,76	2,997E-09			5,015E-11	10,1		
59,83	3,001E-09			5,016E-11	10,1		
59,72	2,990E-09			5,007E-11	10,2		
59,87	2,996E-09			20,46	101,79	5,004E-11	10,2
Médias		20,175	101,79	5,016E-11	10,2	Média	10,17
Desvio padrão				1,426E-13	10,2	Desvio padrão	0,048
Desv. pad. média				6,377E-14	10,2	Desv. pad. média	0,015
Desv. pad. média (%)				0,127	10,2	Desv. pad. média(%)	0,150
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,996E-11			
F(T,P)				0,996026			

**Qualidade N-100 (83 keV) (+60° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,48	5,130E-10	20,28	101,78	8,625E-12	2,42		
59,74	5,140E-10			8,604E-12	2,42		
59,40	5,150E-10			8,670E-12	2,42		
59,44	5,130E-10			8,631E-12	2,42		
59,67	5,140E-10			19,57	101,77	8,614E-12	2,41
Médias		19,925	101,775	8,629E-12	2,41	Média	2,417
Desvio padrão				2,527E-14	2,42	Desvio padrão	0,005
Desv. pad. média				1,130E-14	2,42	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,131	2,42	Desv. pad. média(%)	0,063
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,588E-12			
F(T,P)				0,995324			

**Qualidade N-250 (208 keV) (+60° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,97	3,035E-09	19,57	101,76	5,061E-11	8,93		
59,77	3,021E-09			5,054E-11	8,93		
59,73	3,015E-09			5,048E-11	8,94		
60,17	3,035E-09			5,044E-11	8,94		
59,89	3,021E-09			19,73	101,73	5,044E-11	8,95
Médias		19,65	101,745	5,050E-11	8,93	Média	8,931
Desvio padrão				7,257E-14	8,92	Desvio padrão	0,010
Desv. pad. média				3,245E-14	8,92	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,064	8,92	Desv. pad. média(%)	0,035
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,023E-11			
F(T,P)				0,994683			

**Qualidade N-100 (83 keV) (+90° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,81	5,110E-10	20,30	101,76	8,544E-12	2,45	
59,05	5,090E-10			8,620E-12	2,45	
59,50	5,100E-10			8,571E-12	2,44	
59,71	5,100E-10			8,541E-12	2,42	
59,95	5,110E-10	20,24	101,73	8,524E-12	2,42	
					2,43	
<b>Médias</b>		20,27	101,745	8,560E-12	2,43	<b>Média</b> 2,434
<b>Desvio padrão</b>				3,754E-14	2,44	<b>Desvio padrão</b> 0,011
<b>Desv. pad. média</b>				1,679E-14	2,43	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,196	2,43	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,140
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,533E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,996789					

**Qualidade N-250 (208 keV) (+90° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,81	3,004E-09	19,70	101,72	5,023E-11	8,25	
60,63	3,052E-09			5,034E-11	8,25	
59,61	2,992E-09			5,019E-11	8,24	
59,71	2,994E-09			5,014E-11	8,24	
60,01	3,002E-09	19,76	101,71	5,002E-11	8,23	
					8,23	
<b>Médias</b>		19,73	101,715	5,018E-11	8,23	<b>Média</b> 8,234
<b>Desvio padrão</b>				1,147E-13	8,22	<b>Desvio padrão</b> 0,011
<b>Desv. pad. média</b>				5,128E-14	8,22	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,102	8,23	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,041
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				4,995E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,995248					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-10° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,63	5,060E-10	19,99	101,70	8,486E-12	3,78	
59,91	5,070E-10			8,463E-12	3,78	
59,53	5,060E-10			8,500E-12	3,78	
59,73	5,060E-10			8,471E-12	3,78	
59,60	5,090E-10	19,81	101,70	8,540E-12	3,77	
					3,77	
<b>Médias</b>		19,90	101,70	8,492E-12	3,76	<b>Média</b> 3,773
<b>Desvio padrão</b>				3,047E-14	3,77	<b>Desvio padrão</b> 0,007
<b>Desv. pad. média</b>				1,363E-14	3,77	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,160	3,77	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,057
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,458E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,995973					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-10° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,81	3,028E-09	19,77	101,82	5,063E-11	11,8	
59,68	3,002E-09			5,030E-11	11,8	
59,57	2,986E-09			5,013E-11	11,8	
59,51	2,984E-09			5,014E-11	11,9	
60,09	2,992E-09	20,41	101,83	4,979E-11	11,9	
					11,9	
<b>Médias</b>		20,09	101,825	5,020E-11	11,9	<b>Média</b> 11,85
<b>Desvio padrão</b>				3,033E-13	11,8	<b>Desvio padrão</b> 0,053
<b>Desv. pad. média</b>				1,356E-13	11,8	<b>Desv. pad. média</b> 0,017
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,270	11,9	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,141
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				4,997E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,995395					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-20° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,19	5,080E-10	20,50	101,83	8,583E-12	3,42	
59,53	5,110E-10			8,584E-12	3,42	
59,71	5,090E-10			8,525E-12	3,42	
59,80	5,100E-10			8,528E-12	3,40	
59,73	5,100E-10	20,6	101,84	8,538E-12	3,41	
					3,39	
<b>Médias</b>		20,55	101,835	8,552E-12	3,39	<b>Média</b> 3,404
<b>Desvio padrão</b>				2,934E-14	3,40	<b>Desvio padrão</b> 0,013
<b>Desv. pad. média</b>				1,312E-14	3,39	<b>Desv. pad. média</b> 0,004
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,153	3,40	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,118
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,525E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,996859					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-20° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,64	3,022E-09	19,84	101,83	5,067E-11	11,4	
59,57	3,015E-09			5,061E-11	11,3	
59,53	3,010E-09			5,056E-11	11,3	
59,77	3,012E-09			5,039E-11	11,4	
59,66	2,997E-09	19,50	101,83	5,023E-11	11,3	
					11,3	
<b>Médias</b>		19,67	101,83	5,049E-11	11,4	<b>Média</b> 11,32
<b>Desvio padrão</b>				1,785E-13	11,2	<b>Desvio padrão</b> 0,063
<b>Desv. pad. média</b>				7,983E-14	11,3	<b>Desv. pad. média</b> 0,020
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,158	11,3	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,177
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,019E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,993921					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-30° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,69	5,100E-10	20,10	101,83	8,544E-12	3,39		
59,65	5,100E-10			8,550E-12	3,40		
59,68	5,070E-10			8,495E-12	3,41		
59,40	5,090E-10			8,569E-12	3,41		
59,72	5,100E-10	20,26	101,84	8,540E-12	3,42		
					3,41		
Médias		20,18	101,835	8,540E-12	3,41	Média	3,406
Desvio padrão				2,717E-14	3,41	Desvio padrão	0,008
Desv. pad. média				1,215E-14	3,40	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,142	3,40	Desv. pad. média(%)	0,078
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,502E-12			
F(T,P)	0,995603						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-30° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,44	3,008E-09	19,65	101,84	5,061E-11	11,1		
59,42	3,009E-09			5,064E-11	11,0		
59,47	3,012E-09			5,065E-11	11,0		
59,47	2,997E-09			5,040E-11	11,1		
59,69	3,009E-09	19,84	101,85	5,041E-11	11,1		
					11,2		
Médias		19,745	101,845	5,054E-11	11,2	Média	11,13
Desvio padrão				1,260E-13	11,2	Desvio padrão	0,082
Desv. pad. média				5,635E-14	11,2	Desv. pad. média	0,026
Desv. pad. média (%)				0,111	11,2	Desv. pad. média(%)	0,234
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,024E-11			
F(T,P)	0,994029						

**Qualidade N-100 (83 keV) (-40° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,68	5,080E-10	19,83	101,84	8,512E-12	3,19		
59,74	5,090E-10			8,520E-12	3,19		
59,72	5,100E-10			8,540E-12	3,20		
59,67	5,100E-10			8,547E-12	3,20		
59,71	5,100E-10	19,37	101,84	8,541E-12	3,18		
					3,19		
Médias		19,60	101,84	8,532E-12	3,19	Média	3,19
Desvio padrão				1,507E-14	3,19	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				6,740E-15	3,18	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,079	3,19	Desv. pad. média(%)	0,066
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,477E-12			
F(T,P)	0,993585						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-40° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,76	3,004E-09	20,10	101,84	5,027E-11	10,9	
59,69	3,008E-09			5,039E-11	10,9	
59,21	3,003E-09			5,072E-11	10,9	
59,62	3,004E-09			5,039E-11	10,9	
59,58	3,003E-09	19,77	101,83	5,040E-11	10,9	
					10,9	
<b>Médias</b>		19,935	101,835	5,043E-11	10,9	<b>Média</b> 10,89
<b>Desvio padrão</b>				1,681E-13	10,8	<b>Desvio padrão</b> 0,032
<b>Desv. pad. média</b>				7,520E-14	10,9	<b>Desv. pad. média</b> 0,010
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,149	10,9	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,092
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,017E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,994771					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-45° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,73	5,150E-10	19,94	101,83	8,622E-12	2,94	
59,61	5,130E-10			8,606E-12	2,94	
59,70	5,150E-10			8,626E-12	2,95	
59,63	5,140E-10			8,620E-12	2,96	
59,42	5,120E-10	19,75	101,80	8,617E-12	2,96	
					2,95	
<b>Médias</b>		19,85	101,815	8,618E-12	2,94	<b>Média</b> 2,948
<b>Desvio padrão</b>				7,734E-15	2,94	<b>Desvio padrão</b> 0,008
<b>Desv. pad. média</b>				3,459E-15	2,95	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,040	2,95	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,085
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,572E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,994661					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-45° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,87	3,007E-09	20,54	101,79	5,023E-11	10,5	
60,29	3,012E-09			4,996E-11	10,5	
59,9	3,006E-09			5,018E-11	10,5	
59,88	3,007E-09			5,022E-11	10,5	
59,92	3,007E-09	21,00	101,79	5,018E-11	10,5	
					10,5	
<b>Médias</b>		20,77	101,79	5,015E-11	10,5	<b>Média</b> 10,51
<b>Desvio padrão</b>				1,107E-13	10,5	<b>Desvio padrão</b> 0,032
<b>Desv. pad. média</b>				4,952E-14	10,5	<b>Desv. pad. média</b> 0,010
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,099	10,6	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,095
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,006E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,998046					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-60° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,69	5,130E-10	20,85	101,79	8,594E-12	2,58		
59,65	5,100E-10			8,550E-12	2,59		
59,86	5,120E-10			8,553E-12	2,59		
59,71	5,110E-10			8,558E-12	2,59		
59,71	5,140E-10			20,39	101,79	8,608E-12	2,59
					2,59		
Médias		20,62	101,79	8,573E-12	2,59	Média	2,59
Desvio padrão				2,669E-14	2,59	Desvio padrão	0,005
Desv. pad. média				1,194E-14	2,59	Desv. pad. média	0,001
Desv. pad. média (%)				0,139	2,60	Desv. pad. média(%)	0,058
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,552E-12			
F(T,P)	0,997537						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-60° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,99	3,021E-09	19,42	101,78	5,036E-11	9,02		
59,59	3,009E-09			5,050E-11	9,02		
59,61	3,002E-09			5,036E-11	9,01		
59,74	3,004E-09			5,028E-11	9,03		
59,68	3,004E-09			19,68	101,77	5,034E-11	9,03
					9,03		
Médias		19,55	101,775	5,037E-11	9,03	Média	9,027
Desvio padrão				7,798E-14	9,04	Desvio padrão	0,009
Desv. pad. média				3,487E-14	9,04	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,069	9,02	Desv. pad. média(%)	0,033
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,007E-11			
F(T,P)	0,994050						

**Qualidade N-100 (83 keV) (-90° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,69	5,110E-10	19,65	101,75	8,561E-12	3,31		
59,52	5,100E-10			8,569E-12	3,31		
59,63	5,110E-10			8,570E-12	3,32		
59,78	5,080E-10			8,498E-12	3,31		
59,77	5,080E-10			20,81	101,74	8,499E-12	3,30
					3,30		
Médias		20,23	101,745	8,539E-12	3,30	Média	3,304
Desvio padrão				3,728E-14	3,30	Desvio padrão	0,008
Desv. pad. média				1,667E-14	3,30	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,195	3,29	Desv. pad. média(%)	0,081
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,511E-12			
F(T,P)	0,996653						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-90° - plano horizontal)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,52	3,026E-09	19,92	101,74	5,084E-11	9,33		
59,71	3,026E-09			5,068E-11	9,33		
59,74	3,022E-09			5,059E-11	9,33		
59,53	3,017E-09			5,068E-11	9,33		
59,79	3,026E-09	19,98	101,74	5,061E-11	9,34		
					9,34		
<b>Médias</b>		19,95	101,74	5,068E-11	9,34	<b>Média</b>	9,339
<b>Desvio padrão</b>				9,913E-14	9,35	<b>Desvio padrão</b>	0,010
<b>Desv. pad. média</b>				4,433E-14	9,34	<b>Desv. pad. média</b>	0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,087	9,36	<b>Desv. pad. média(%)</b>	0,034
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,046E-11			
<b>F(T,P)</b>	0,995751						

**Qualidade N-100 (83 keV) (0° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,61	5,130E-10	20,50	101,62	8,606E-12	4,22		
59,40	5,110E-10			8,603E-12	4,20		
59,55	5,120E-10			8,598E-12	4,23		
59,61	5,120E-10			8,589E-12	4,24		
59,64	5,120E-10	19,63	101,61	8,585E-12	4,25		
					4,22		
<b>Médias</b>		20,07	101,615	8,596E-12	4,23	<b>Média</b>	4,224
<b>Desvio padrão</b>				8,917E-15	4,22	<b>Desvio padrão</b>	0,014
<b>Desv. pad. média</b>				3,988E-15	4,22	<b>Desv. pad. média</b>	0,005
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,046	4,21	<b>Desv. pad. média(%)</b>	0,107
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,573E-12			
<b>F(T,P)</b>	0,997367						

**Qualidade N-250 (208 keV) (0° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,83	3,041E-09	20,08	101,61	5,083E-11	12,4		
59,63	3,029E-09			5,080E-11	12,4		
60,07	3,045E-09			5,069E-11	12,4		
59,58	3,023E-09			5,074E-11	12,3		
59,62	3,032E-09	20,16	101,59	5,086E-11	12,3		
					12,3		
<b>Médias</b>		20,12	101,60	5,078E-11	12,3	<b>Média</b>	12,34
<b>Desvio padrão</b>				6,681E-14	12,3	<b>Desvio padrão</b>	0,052
<b>Desv. pad. média</b>				2,988E-14	12,3	<b>Desv. pad. média</b>	0,016
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,059	12,4	<b>Desv. pad. média(%)</b>	0,132
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,067E-11			
<b>F(T,P)</b>	0,997702						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+10° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,78	5,140E-10	20,33	101,61	8,598E-12	4,37	
59,66	5,090E-10			8,532E-12	4,37	
59,55	5,080E-10			8,531E-12	4,36	
59,68	5,080E-10			8,512E-12	4,36	
59,55	5,080E-10	20,78	101,59	8,531E-12	4,36	
					4,35	
<b>Médias</b>		20,56	101,60	8,541E-12	4,35	<b>Média</b> 4,359
<b>Desvio padrão</b>				3,320E-14	4,36	<b>Desvio padrão</b> 0,007
<b>Desv. pad. média</b>				1,485E-14	4,35	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,174	4,36	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,054
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,534E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,999181					

**Qualidade N-250 (208 keV) (+10° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,50	3,041E-09	20,40	101,61	5,111E-11	12,8	
59,88	3,031E-09			5,062E-11	12,8	
59,63	3,038E-09			5,095E-11	12,8	
59,61	3,040E-09			5,100E-11	12,8	
59,51	3,026E-09	20,52	101,59	5,085E-11	12,8	
					12,8	
<b>Médias</b>		20,46	101,60	5,090E-11	12,8	<b>Média</b> 12,82
<b>Desvio padrão</b>				1,856E-13	12,8	<b>Desvio padrão</b> 0,042
<b>Desv. pad. média</b>				8,301E-14	12,9	<b>Desv. pad. média</b> 0,013
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,163	12,9	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,104
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,085E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,998858					

**Qualidade N-100 (83 keV) (+20° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,96	5,090E-10	20,00	101,58	8,489E-12	4,43	
59,86	5,110E-10			8,537E-12	4,44	
59,70	5,100E-10			8,543E-12	4,44	
59,81	5,110E-10			8,544E-12	4,45	
59,71	5,080E-10	20,53	101,57	8,508E-12	4,46	
					4,45	
<b>Médias</b>		20,27	101,575	8,524E-12	4,45	<b>Média</b> 4,443
<b>Desvio padrão</b>				2,442E-14	4,44	<b>Desvio padrão</b> 0,009
<b>Desv. pad. média</b>				1,092E-14	4,44	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,128	4,43	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,068
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,511E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,998441					

**Qualidade N-250 (208 keV) (+20° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,49	3,035E-09	20,21	101,57	5,102E-11	12,6		
59,76	3,025E-09			5,062E-11	12,5		
59,42	3,009E-09			5,064E-11	12,5		
59,73	3,016E-09			5,049E-11	12,5		
59,60	3,014E-09	19,94	101,55	5,057E-11	12,5		
					12,5		
<b>Médias</b>		20,075	101,56	5,067E-11	12,6	<b>Média</b>	12,51
<b>Desvio padrão</b>				2,030E-13	12,4	<b>Desvio padrão</b>	0,057
<b>Desv. pad. média</b>				9,078E-14	12,5	<b>Desv. pad. média</b>	0,018
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,179	12,5	<b>Desv. pad. média(%)</b>	0,143
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,056E-11			
<b>F(T,P)</b>	0,997941						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+30° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,57	5,130E-10	20,20	101,55	8,612E-12	4,37		
59,67	5,120E-10			8,581E-12	4,38		
59,69	5,120E-10			8,578E-12	4,36		
59,50	5,100E-10			8,571E-12	4,36		
59,79	5,120E-10	19,86	101,54	8,563E-12	4,35		
					4,35		
<b>Médias</b>		20,03	101,545	8,581E-12	4,35	<b>Média</b>	4,359
<b>Desvio padrão</b>				1,844E-14	4,36	<b>Desvio padrão</b>	0,010
<b>Desv. pad. média</b>				8,245E-15	4,36	<b>Desv. pad. média</b>	0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,096	4,35	<b>Desv. pad. média(%)</b>	0,072
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,563E-12			
<b>F(T,P)</b>	0,997936						

**Qualidade N-250 (208 keV) (+30° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,61	3,032E-09	20,12	101,53	5,086E-11	12,6		
59,48	3,021E-09			5,079E-11	12,6		
59,60	3,018E-09			5,064E-11	12,7		
59,68	3,024E-09			5,067E-11	12,5		
59,73	3,020E-09	20,46	101,53	5,056E-11	12,5		
					12,5		
<b>Médias</b>		20,29	101,53	5,070E-11	12,6	<b>Média</b>	12,58
<b>Desvio padrão</b>				1,215E-13	12,6	<b>Desvio padrão</b>	0,063
<b>Desv. pad. média</b>				5,434E-14	12,6	<b>Desv. pad. média</b>	0,020
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,107	12,6	<b>Desv. pad. média(%)</b>	0,159
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,065E-11			
<b>F(T,P)</b>	0,998968						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+40° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,73	5,140E-10	20,58	101,54	8,605E-12	4,55	
59,67	5,120E-10			8,581E-12	4,54	
59,52	5,100E-10			8,569E-12	4,54	
59,71	5,100E-10			8,541E-12	4,53	
59,68	5,120E-10	19,89	101,55	8,579E-12	4,53	
					4,54	
<b>Médias</b>		20,235	101,545	8,575E-12	4,54	<b>Média</b> 4,536
<b>Desvio padrão</b>				2,318E-14	4,53	<b>Desvio padrão</b> 0,007
<b>Desv. pad. média</b>				1,037E-14	4,53	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,121	4,53	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,049
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,563E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,998633					

**Qualidade N-250 (208 keV) (+40° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,67	3,041E-09	19,86	101,55	5,096E-11	13,1	
59,75	3,042E-09			5,091E-11	13,0	
59,70	3,031E-09			5,077E-11	13,0	
59,60	3,021E-09			5,069E-11	13,0	
59,72	3,020E-09	20,31	101,56	5,057E-11	13,0	
					13,1	
<b>Médias</b>		20,085	101,555	5,078E-11	13,1	<b>Média</b> 13,05
<b>Desvio padrão</b>				1,613E-13	13,1	<b>Desvio padrão</b> 0,053
<b>Desv. pad. média</b>				7,216E-14	13,0	<b>Desv. pad. média</b> 0,017
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,142	13,1	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,128
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,068E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,998025					

**Qualidade N-100 (83 keV) (+45° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,28	5,100E-10	19,50	101,57	8,603E-12	4,45	
59,79	5,120E-10			8,563E-12	4,44	
59,58	5,120E-10			8,593E-12	4,43	
59,48	5,110E-10			8,591E-12	4,43	
59,80	5,120E-10	20,06	101,57	8,562E-12	4,44	
					4,45	
<b>Médias</b>		19,78	101,57	8,583E-12	4,46	<b>Média</b> 4,445
<b>Desvio padrão</b>				1,884E-14	4,45	<b>Desvio padrão</b> 0,010
<b>Desv. pad. média</b>				8,423E-15	4,45	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,098	4,45	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,069
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,555E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,996839					

**Qualidade N-250 (208 keV) (+45° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,50	2,992E-09	19,99	101,57	5,029E-11	12,5		
59,58	3,007E-09			5,047E-11	12,4		
59,87	3,028E-09			5,058E-11	12,4		
59,67	3,013E-09			5,049E-11	12,5		
59,58	3,002E-09	19,96	101,57	5,039E-11	12,5		
Médias		19,975	101,57	5,044E-11	12,5	Média	12,48
Desvio padrão				1,108E-13	12,5	Desvio padrão	0,042
Desv. pad. média				4,955E-14	12,5	Desv. pad. média	0,013
Desv. pad. média (%)				0,098	12,5	Desv. pad. média(%)	0,107
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,032E-11			
F(T,P)	0,997503						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+60° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,75	5,100E-10	20,10	101,57	8,536E-12	4,44		
59,74	5,100E-10			8,537E-12	4,44		
59,58	5,070E-10			8,510E-12	4,45		
59,65	5,080E-10			8,517E-12	4,46		
59,70	5,080E-10	20,27	101,58	8,509E-12	4,46		
					4,47		
Médias		20,19	101,575	8,522E-12	4,48	Média	4,459
Desvio padrão				1,370E-14	4,46	Desvio padrão	0,013
Desv. pad. média				6,127E-15	4,46	Desv. pad. média	0,004
Desv. pad. média (%)				0,072	4,47	Desv. pad. média(%)	0,091
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,506E-12			
F(T,P)	0,998168						

**Qualidade N-250 (208 keV) (+60° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,60	2,995E-09	20,63	101,58	5,025E-11	12,5		
59,88	3,038E-09			5,073E-11	12,5		
59,72	3,008E-09			5,037E-11	12,5		
59,40	3,005E-09			5,059E-11	12,5		
59,50	3,008E-09	19,79	101,59	5,055E-11	12,5		
					12,5		
Médias		20,21	101,585	5,050E-11	12,6	Média	12,52
Desvio padrão				1,904E-13	12,6	Desvio padrão	0,042
Desv. pad. média				8,517E-14	12,5	Desv. pad. média	0,013
Desv. pad. média (%)				0,169	12,5	Desv. pad. média(%)	0,106
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,041E-11			
F(T,P)	0,998155						

**Qualidade N-100 (83 keV) (+90° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,57	5,090E-10	20,62	101,60	8,545E-12	4,46	
59,85	5,130E-10			8,571E-12	4,44	
59,78	5,130E-10			8,581E-12	4,46	
59,85	5,150E-10			8,605E-12	4,46	
59,69	5,140E-10	20,19	101,61	8,611E-12	4,47	
					4,46	
<b>Médias</b>		20,405	101,605	8,583E-12	4,47	<b>Média</b> 4,456
<b>Desvio padrão</b>				2,685E-14	4,45	<b>Desvio padrão</b> 0,011
<b>Desv. pad. média</b>				1,201E-14	4,44	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,140	4,45	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,076
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,571E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,998622					

**Qualidade N-250 (208 keV) (+90° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,71	3,003E-09	19,85	101,60	5,029E-11	12,6	
59,42	3,003E-09			5,054E-11	12,6	
59,51	3,004E-09			5,048E-11	12,6	
59,61	3,007E-09			5,044E-11	12,6	
59,70	3,005E-09	20,06	101,61	5,034E-11	12,6	
					12,7	
<b>Médias</b>		19,955	101,605	5,042E-11	12,7	<b>Média</b> 12,65
<b>Desvio padrão</b>				1,018E-13	12,7	<b>Desvio padrão</b> 0,053
<b>Desv. pad. média</b>				4,552E-14	12,7	<b>Desv. pad. média</b> 0,017
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,090	12,7	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,132
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,027E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,997091					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-10° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,87	5,100E-10	19,94	101,90	8,518E-12	3,81	
59,65	5,070E-10			8,500E-12	3,81	
59,63	5,050E-10			8,469E-12	3,81	
60,02	5,080E-10			8,464E-12	3,82	
59,54	5,070E-10	20,40	101,93	8,515E-12	3,83	
					3,83	
<b>Médias</b>		20,17	101,915	8,493E-12	3,82	<b>Média</b> 3,816
<b>Desvio padrão</b>				2,559E-14	3,81	<b>Desvio padrão</b> 0,008
<b>Desv. pad. média</b>				1,144E-14	3,81	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,135	3,81	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,070
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,449E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,994787					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-10° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,55	3,009E-09	20,79	101,97	5,053E-11	11,6	
59,74	3,018E-09			5,052E-11	11,6	
59,45	2,990E-09			5,029E-11	11,6	
59,63	2,998E-09			5,028E-11	11,6	
59,58	2,997E-09	19,93	101,98	5,030E-11	11,5	
					11,5	
<b>Médias</b>		20,36	101,975	5,038E-11	11,5	<b>Média</b> 11,56
<b>Desvio padrão</b>				1,279E-13	11,5	<b>Desvio padrão</b> 0,052
<b>Desv. pad. média</b>				5,721E-14	11,6	<b>Desv. pad. média</b> 0,016
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,114	11,6	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,141
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,012E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,994846					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-20° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
60,14	5,150E-10	20,56	101,98	8,563E-12	3,28	
59,48	5,070E-10			8,524E-12	3,29	
59,63	5,100E-10			8,553E-12	3,28	
59,38	5,070E-10			8,538E-12	3,28	
59,45	5,080E-10	19,74	102,00	8,545E-12	3,27	
					3,27	
<b>Médias</b>		20,15	101,99	8,545E-12	3,26	<b>Média</b> 3,271
<b>Desvio padrão</b>				1,490E-14	3,26	<b>Desvio padrão</b> 0,011
<b>Desv. pad. média</b>				6,664E-15	3,26	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,078	3,26	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,106
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,493E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,993988					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-20° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,56	2,994E-09	19,93	102,00	5,027E-11	11,3	
59,61	2,989E-09			5,014E-11	11,2	
59,58	2,985E-09			5,010E-11	11,2	
59,70	3,003E-09			5,030E-11	11,1	
59,71	3,001E-09	20,41	102,01	5,026E-11	11,1	
					11,1	
<b>Médias</b>		20,17	102,005	5,021E-11	11,1	<b>Média</b> 11,14
<b>Desvio padrão</b>				8,754E-14	11,1	<b>Desvio padrão</b> 0,070
<b>Desv. pad. média</b>				3,915E-14	11,1	<b>Desv. pad. média</b> 0,022
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,078	11,1	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,198
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				4,991E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,993910					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-30° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,54	5,050E-10	20,65	102,00	8,482E-12	2,79	
59,74	5,070E-10			8,487E-12	2,78	
59,63	5,070E-10			8,502E-12	2,79	
59,61	5,060E-10			8,489E-12	2,78	
59,70	5,070E-10	20,86	102,01	8,492E-12	2,76	
					2,76	
<b>Médias</b>		20,755	102,005	8,490E-12	2,75	<b>Média</b> 2,767
<b>Desvio padrão</b>				7,771E-15	2,76	<b>Desvio padrão</b> 0,016
<b>Desv. pad. média</b>				3,475E-15	2,75	<b>Desv. pad. média</b> 0,005
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,041	2,75	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,187
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,455E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,995892					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-30° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,73	3,004E-09	20,33	102,00	5,029E-11	10,3	
59,68	3,006E-09			5,037E-11	10,3	
59,75	3,004E-09			5,028E-11	10,3	
59,60	3,006E-09			5,044E-11	10,3	
59,62	3,005E-09	19,90	102,01	5,040E-11	10,3	
					10,3	
<b>Médias</b>		20,115	102,005	5,036E-11	10,3	<b>Média</b> 10,3
<b>Desvio padrão</b>				6,912E-14	10,3	<b>Desvio padrão</b> 0
<b>Desv. pad. média</b>				3,091E-14	10,3	<b>Desv. pad. média</b> 0
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,061	10,3	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,004E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,993723					

**Qualidade N-100 (83 keV) (-40° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,33	5,120E-10	20,42	101,96	8,630E-12	2,54	
59,53	5,100E-10			8,567E-12	2,54	
59,50	5,080E-10			8,538E-12	2,54	
59,89	5,080E-10			8,482E-12	2,54	
59,49	5,100E-10	19,86	101,93	8,573E-12	2,54	
					2,53	
<b>Médias</b>		20,14	101,945	8,558E-12	2,53	<b>Média</b> 2,536
<b>Desvio padrão</b>				5,384E-14	2,52	<b>Desvio padrão</b> 0,007
<b>Desv. pad. média</b>				2,408E-14	2,54	<b>Desv. pad. média</b> 0,002
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,281	2,54	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,087
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				8,510E-12		
<b>F(T,P)</b>	0,994393					

**Qualidade N-250 (208 keV) (-40° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,75	2,975E-09	20,22	101,92	4,979E-11	9,74		
59,50	3,011E-09			5,061E-11	9,75		
59,99	3,020E-09			5,034E-11	9,74		
60,13	3,001E-09			4,991E-11	9,76		
59,96	2,998E-09	20,89	101,92	5,000E-11	9,75		
					9,75		
Médias		20,555	101,92	5,013E-11	9,73	Média	9,742
Desvio padrão				3,360E-13	9,73	Desvio padrão	0,010
Desv. pad. média				1,502E-13	9,73	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,300	9,74	Desv. pad. média(%)	0,034
Média da taxa corrigida p/ T,P				4,993E-11			
F(T,P)	0,996044						

**Qualidade N-100 (83 keV) (-45° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,54	5,140E-10	20,99	101,90	8,633E-12	2,32		
59,30	5,130E-10			8,651E-12	2,31		
59,40	5,130E-10			8,636E-12	2,30		
59,60	5,120E-10			8,591E-12	2,30		
59,72	5,140E-10	20,15	101,88	8,607E-12	2,30		
					2,30		
Médias		20,57	101,89	8,624E-12	2,30	Média	2,306
Desvio padrão				2,432E-14	2,31	Desvio padrão	0,007
Desv. pad. média				1,087E-14	2,31	Desv. pad. média	0,002
Desv. pad. média (%)				0,126	2,31	Desv. pad. média(%)	0,096
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,592E-12			
F(T,P)	0,996388						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-45° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,57	3,020E-09	19,91	101,87	5,070E-11	9,67		
59,49	3,016E-09			5,070E-11	9,68		
59,49	3,001E-09			5,045E-11	9,68		
59,67	3,011E-09			5,046E-11	9,68		
59,57	2,997E-09	20,61	101,86	5,031E-11	9,67		
					9,66		
Médias		20,26	101,865	5,052E-11	9,66	Média	9,668
Desvio padrão				1,700E-13	9,66	Desvio padrão	0,009
Desv. pad. média				7,604E-14	9,66	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,151	9,66	Desv. pad. média(%)	0,030
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,030E-11			
F(T,P)	0,995581						

**Qualidade N-100 (83 keV) (-60° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,47	5,110E-10	20,12	101,84	8,593E-12	1,82		
59,73	5,120E-10			8,572E-12	1,84		
59,55	5,100E-10			8,564E-12	1,85		
59,60	5,110E-10			8,574E-12	1,85		
59,70	5,120E-10	20,63	101,85	8,576E-12	1,84		
					1,84		
Médias		20,38	101,845	8,576E-12	1,83	Média	1,834
Desvio padrão				1,042E-14	1,83	Desvio padrão	0,012
Desv. pad. média				4,659E-15	1,82	Desv. pad. média	0,004
Desv. pad. média (%)				0,054	1,82	Desv. pad. média(%)	0,202
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,543E-12			
F(T,P)	0,996167						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-60° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,59	3,038E-09	20,26	101,86	5,098E-11	8,77		
59,63	3,037E-09			5,093E-11	8,75		
59,60	3,032E-09			5,087E-11	8,74		
59,67	3,031E-09			5,080E-11	8,74		
59,48	3,012E-09	19,90	101,85	5,064E-11	8,74		
					8,75		
Médias		20,08	101,855	5,084E-11	8,76	Média	8,75
Desvio padrão				1,339E-13	8,75	Desvio padrão	0,011
Desv. pad. média				5,987E-14	8,76	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,118	8,74	Desv. pad. média(%)	0,038
Média da taxa corrigida p/ T,P				5,059E-11			
F(T,P)	0,995068						

**Qualidade N-100 (83 keV) (-90° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026		
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)		
59,43	5,150E-10	20,01	101,85	8,666E-12	1,80		
59,46	5,150E-10			8,661E-12	1,79		
59,63	5,150E-10			8,637E-12	1,79		
59,47	5,140E-10			8,643E-12	1,79		
59,60	5,130E-10	20,49	101,85	8,607E-12	1,78		
					1,78		
Médias		20,25	101,85	8,643E-12	1,77	Média	1,784
Desvio padrão				2,322E-14	1,77	Desvio padrão	0,010
Desv. pad. média				1,039E-14	1,79	Desv. pad. média	0,003
Desv. pad. média (%)				0,120	1,78	Desv. pad. média(%)	0,171
Média da taxa corrigida p/ T,P				8,606E-12			
F(T,P)	0,995694						

**Qualidade N-250 (208 keV) (-90° - plano vertical)**

Medições na Câmara Monitora					Medições no MIR 7026	
Tempo (s)	Leitura (ue)	T (°C)	P (kPa)	Taxa de Leitura (ue/s)	Leitura (mSv/h)	
59,57	3,021E-09	21,00	101,85	5,071E-11	8,81	
59,72	3,026E-09			5,067E-11	8,82	
59,72	3,028E-09			5,070E-11	8,81	
59,55	3,012E-09			5,058E-11	8,80	
59,16	2,995E-09	20,58	101,85	5,063E-11	8,81	
					8,79	
<b>Médias</b>		20,79	101,85	5,066E-11	8,80	<b>Média</b> 8,804
<b>Desvio padrão</b>				5,593E-14	8,80	<b>Desvio padrão</b> 0,010
<b>Desv. pad. média</b>				2,501E-14	8,81	<b>Desv. pad. média</b> 0,003
<b>Desv. pad. média (%)</b>				0,049	8,79	<b>Desv. pad. média(%)</b> 0,035
<b>Média da taxa corrigida p/ T,P</b>				5,053E-11		
<b>F(T,P)</b>	0,997526					

## 8 ANEXOS

## 8.1 ANEXO 1: GRANDEZAS E UNIDADES RADIOLÓGICAS DE USO GERAL

### GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

As grandezas radiométricas caracterizam os campos de radiação compostos de todos os tipos de radiação. Estas grandezas se aplicam no espaço livre, assim como na matéria (ICRU 51, 1993).

Podem ser citadas as seguintes grandezas radiométricas:

#### a) Fluência

A fluência de fótons,  $\Phi$ , é definida (ICRU 33, 1980) como o quociente de  $dN$  por  $da$ , onde  $dN$  é o número de partículas incidentes sobre uma esfera de seção de área  $da$ ,

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

sua unidade no SI é o  $\text{m}^{-2}$ .

#### b) Fluência de energia

A fluência de energia,  $\psi$ , de partículas é o quociente de  $dE$  por  $da$ , onde  $dE$  é a soma das energias, excluindo a de repouso, de todas as partículas que atravessam uma esfera de seção de área  $da$ ,

$$\psi = \frac{dE}{da}$$

sua unidade no SI é o  $\text{J m}^{-2}$ .

Outras grandezas radiométricas mais específicas (distribuição de fluência no tempo, energia e direção), são definidas como quocientes diferenciais (ICRU 33, 1980). O numerador é o diferencial de fluência e o denominador é o diferencial de tempo, energia, direção, ou algum produto deles.

## COEFICIENTES DE INTERAÇÃO

Os coeficientes de interação caracterizam as interações da radiação com a matéria, e são usualmente especificados para uma dada radiação, energias, materiais e para um dado tipo de interação.

Podem ser citados os seguintes coeficientes de interação:

### a) Seção de choque

A seção de choque,  $\sigma$ , é definida (ICRU 33, 1980) como o quociente de  $P$  por  $\Phi$ , onde  $P$  representa a probabilidade de interação de um alvo quando sujeito a uma fluência,  $\Phi$ , de partículas,

$$\sigma = \frac{P}{\Phi}$$

sua unidade no SI é o  $\text{m}^2$ .

### b) Coeficiente de atenuação de massa

O coeficiente de atenuação de massa,  $\mu/\rho$ , de um material para partículas ionizantes não carregadas é definido (ICRU 33, 1980) como o quociente de  $dN/N$  por  $\rho dl$ , onde  $dN/N$  representa a fração de partículas que sofrem interação ao percorrer uma distância  $dl$  em um material de densidade  $\rho$ ,

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl}$$

sua unidade no SI é o  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ .

O valor de  $\mu/\rho$  é constante para uma dada energia da radiação, e indica a fração de partículas que sofrem interação com a matéria por unidade superficial de massa.

Para fótons (raios X ou gama), as componentes de  $\mu/\rho$  podem ser expressas da seguinte forma:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

onde as componentes do coeficiente de atenuação de massa se referem aos efeitos fotoelétrico, Compton, espalhamento coerente e produção de pares, respectivamente.

**c) Coeficiente de transferência de energia por massa**

O coeficiente de transferência de energia por massa,  $\mu_{tr}/\rho$ , de um material para partículas ionizantes não carregadas é definido (ICRU 33, 1980) como o quociente de  $dE_{tr}/EN$  por  $\rho dl$ , onde  $E$  é a energia de cada partícula (excluída a energia de repouso),  $N$  é o número de partículas incidentes e  $dE_{tr}/EN$  é a fração da energia das partículas incidentes que é transferida como energia cinética das partículas carregadas, pelas interações, ao atravessar uma distância  $dl$  em um material de densidade  $\rho$ ,

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \frac{dE_{tr}}{dl}$$

sua unidade no SI é o  $m^2 kg^{-1}$ .

O valor de  $\mu_{tr}/\rho$  indica a fração da energia de uma partícula que é transferida como energia cinética para as partículas carregadas por unidade de massa superficial.

Para fótons tem-se:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

onde as componentes do coeficiente de transferência de energia por massa se referem aos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares, respectivamente.

**d) Coeficiente de absorção de energia por massa**

O coeficiente de absorção de energia por massa,  $\mu_{en}/\rho$ , de um material para partículas ionizantes não carregadas é definido (ICRU 33, 1980) como o produto entre o coeficiente de transferência de energia por massa,  $(\mu_{tr}/\rho)$ , e  $(1-g)$ , onde  $g$  é a fração de energia das partículas secundárias carregadas que é perdida por radiação de freamento (*bremstrahlung*) no material,

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g)$$

tendo como unidade no SI o  $\text{m}^2 \text{Kg}^{-1}$ .

Os valores de  $\mu_{en}/\rho$  e  $\mu_{tr}/\rho$  podem diferir significativamente quando, por exemplo, as energias cinéticas das partículas secundárias carregadas são comparáveis ou maiores que suas energias de repouso, particularmente para interações com materiais de número atômico elevado.

#### e) Poder de frenagem total de massa

Quando uma partícula carregada penetra em um material ela perde energia durante a sua trajetória por colisão e por produção de *bremstrahlung*. Classicamente, quando uma partícula carregada (elétron) tem sua trajetória desviada pelo campo coulombiano do núcleo, a aceleração radial causa uma perda de energia da partícula em forma de radiação eletromagnética. Esta radiação é denominada de radiação de frenagem e sua intensidade aumenta com a energia inicial da partícula, e é proporcional à razão  $Z/m$ , onde  $Z$  é o número atômico do material absorvedor e  $m$  é a massa da partícula.

O poder de frenagem total de massa,  $S/\rho$ , de um material para partículas carregadas é definido (ICRU 19, 1971) como o quociente de  $dE$  por  $\rho dl$ , onde  $dE$  é a energia perdida por uma partícula carregada ao atravessar uma distância  $dl$  de um material de densidade  $\rho$ ,

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$$

em que  $S$  é o poder de frenagem linear total. A unidade do poder de frenagem total de massa no SI é o  $\text{J m}^2 \text{kg}^{-1}$ .

Para energias onde as interações nucleares podem ser desprezadas, tem-se a seguinte relação:

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{col} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dl} \right)_{rad}$$

onde  $(dE/dl)_{col} = S_{col}$  é o poder de frenagem linear por colisão e  $(dE/dl)_{rad} = S_{rad}$  é o poder de frenagem linear por radiação.

A distinção entre os poderes de frenagem por colisão e por radiação é de extrema utilidade, pois a energia transferida em ionização e excitação dos átomos em um dado meio é

absorvida perto da trajetória da partícula, enquanto que a energia perdida como *bremsstrahlung* é transferida normalmente longe da trajetória da partícula.

#### f) **Transferência linear de energia ou poder de frenagem por colisão linear**

A transferência linear de energia ou poder de frenagem por colisão linear,  $L$ , de partículas carregadas no meio é definido (ICRU 33, 1980) como o quociente  $dE$  por  $dl$ , onde  $dE$  é a energia média perdida por uma partícula, devido a colisões com elétrons ao atravessar uma distância  $dl$ ,

$$L = \frac{dE}{dl}$$

sua unidade no SI é o  $\text{J m}^{-1}$ .

O conceito mais genérico de transferência linear de energia envolve um limiar de energia. No entanto, na publicação ICRU 51, é adotada a definição simples de transferência linear de energia (não-restrita) (ICRU 51, 1993).

### **GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS**

Os efeitos da radiação dependem da extensão do campo de radiação, bem como do grau de interação entre a radiação e a matéria.

As grandezas dosimétricas têm o objetivo de fornecer uma medida física em um ponto ou região de interesse, para correlacioná-la com o efeito biológico real da radiação ionizante. Elas são, essencialmente, produtos das grandezas radiométricas e os coeficientes de interação. Apesar das grandezas dosimétricas serem calculadas a partir de tais produtos, elas não são definidas desta maneira porque são geralmente medidas diretamente.

A grandeza dosimétrica primária escolhida para representar a deposição de energia no ar é o *kerma* (*kinetic energy released per unit of mass*), definido como o quociente de  $dE_{tr}$  por  $dm$ , onde  $dE_{tr}$  é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas não carregadas incidentes em um material de massa  $dm$ ,

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

a unidade de *kerma* no SI é o  $\text{J kg}^{-1}$  com o nome especial de *Gray* (Gy).

O *kerma* tem a vantagem de ser independente da complexidade do transporte de energia pelas cargas secundárias. Ele pode ser calculado a partir da fluência de energia, através da seguinte equação:

$$K = \psi \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = \Phi E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$$

sendo  $E(\mu_{tr}/\rho)$  chamado de fator de *kerma* ( $F_n$ ).

Como o *kerma* inclui a energia recebida pelas partículas carregadas, normalmente elétrons de ionização, estes podem dissipá-la nas colisões sucessivas com outros elétrons, ou na produção de radiação de freamento (*bremsstrahlung*), assim,

$$K = K_c + K_r$$

onde:

$K_c$  = *kerma de colisão*, isto é, quando a energia é dissipada localmente, gerando excitações e/ou ionizações;

$K_r$  = *kerma de radiação*, isto é, quando a energia é conduzida para longe, por meio de fótons.

Além do *Kerma*, as seguintes grandezas dosimétricas podem ser citadas:

#### a) **Energia depositada**

A energia depositada,  $\varepsilon$ , pela radiação ionizante em um meio, em um dado volume é definida como (ICRU 33, 1980):

$$\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

onde:

$R_{in}$  = energia radiante incidente em um volume, isto é, a soma das energias (excluindo a energia de repouso) de todas as partículas ionizantes carregadas e não carregadas que entram no volume em questão;

.  $R_{out}$  = energia radiante que sai do volume, isto é, a soma de todas as energias (excluindo a energia de repouso) de todas as partículas ionizantes carregadas e não carregadas que saem do volume;

$\Sigma Q$  = soma de todas as variações das energias de repouso do núcleo e partículas elementares devido a transformações que possam ter ocorrido no volume considerado.

A unidade de energia depositada no SI é o J.

### b) Dose absorvida

A dose absorvida é a grandeza dosimétrica que representa a deposição de energia em um órgão ou tecido de interesse, definida (ICRU 33, 1980) como o quociente da energia média depositada,  $d\varepsilon$ , pela radiação ionizante na matéria de massa  $dm$ ,

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

tendo como unidade no SI o  $J\ kg^{-1}$ . O nome especial da unidade de dose absorvida é o Gray (Gy) e 1 Gy é igual a  $1\ J\ kg^{-1}$ .

Essa grandeza é definida com a intenção de providenciar uma medida física que seja correlacionada com o efeito biológico da radiação ionizante. Quando definida em um ponto no tecido do corpo humano ou em fantomas é usada para definir as grandezas operacionais (ICRU 51, 1993). Quando medida sobre tecidos e órgãos, a dose absorvida é usada para definir as grandezas de proteção (ICRP 60, 1991).

Na condição de equilíbrio eletrônico ou equilíbrio de partículas carregadas, a dose absorvida,  $D$ , no volume  $V$ , é igual ao *kerma de colisão*,  $K_c$ . Para fótons monoenergéticos ambas as grandezas estão relacionadas à fluência,  $\psi$ , pela EQ 2.17:

$$D = K_c = \psi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)$$

### c) Exposição

A exposição é definida (ICRU 33, 1980) como o quociente de  $dQ$  por  $dm$ , onde  $dQ$  é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados por fótons em uma massa,  $dm$ , de ar, são completamente parados no ar. Desta forma,

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

tendo como unidade no SI o  $C\ kg^{-1}$ . A unidade especial de exposição é o Röentgen (R), sendo que 1R é igual a  $2,58 \times 10^{-4}\ C\ kg^{-1}$ .

A exposição é definida somente para fótons (raios X e gama).

Uma definição alternativa de exposição é (ICRU 33, 1980) (ATTIX, 1986):

$$X = \psi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,ar} \left( \frac{e}{\bar{W}} \right)_{ar}$$

onde:

$e$  = carga do elétron;

$\bar{W}$  = energia média gasta para produção de um par de íons no ar.

## 8.2 ANEXO 2: METODOLOGIA DE CÁLCULO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS MEDIÇÕES

A incerteza do resultado de uma medição geralmente consiste de vários componentes que podem ser agrupados em duas categorias, de acordo com o método utilizado para estimar seu valor numérico: tipo A e tipo B.

A seguir, será descrita a metodologia que foi utilizada neste trabalho para cálculo e expressão da incerteza na determinação da resposta energética e angular para a grandeza  $H^*(10)$ . Esta metodologia é baseada na Segunda Edição Brasileira do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (INMETRO, 1998).

### INCERTEZAS TIPO A

Em uma série de  $n$  medições, com valores observados  $x_i$ , a melhor estimativa da grandeza  $x$  é dada pela média aritmética:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

A dispersão dos valores medidos em torno de sua média  $\bar{x}$  é caracterizada, para um resultado individual  $x_i$ , pelo desvio padrão:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

e a grandeza  $s^2(x_i)$  é chamada de variância empírica de uma medida individual, baseada no tamanho da amostra  $n$ .

Freqüentemente estamos interessados no valor do desvio padrão da média, escrito como  $s(\bar{x})$ , para o qual é aplicado a equação abaixo:

$$s(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} s(x_i)$$

A incerteza associada a cada valor medido pode ser expressa percentualmente como um desvio padrão da média relativo (incerteza relativa), por meio da equação:

$$s(\bar{x})(\%) = \frac{s(\bar{x})}{\bar{x}} \times 100$$

A incerteza padrão tipo A ( $u_A$ ) será então identificada como o desvio padrão da média, ou seja,  $u_A = s(\bar{x})$ . Em princípio, a incerteza tipo A poderá sempre ser reduzida aumentando o número de leituras  $n$ , só que na prática, as possibilidades de redução freqüentemente são limitadas.

## **INCERTEZAS TIPO B**

Existem muitas fontes de incertezas que não podem ser estimadas por medidas repetitivas. Elas são chamadas incertezas tipo B. Isso inclui não só influências da falta de conhecimento no processo de medição, mas também pouco conhecimento das grandezas que influenciam (pressão, temperatura, etc.), aplicação de fatores de correção ou dados físicos tomados da literatura.

Quando as informações sobre a incerteza, ou relacionada à incerteza, provém de fontes externas, estas informações geralmente correspondem a mais de um desvio padrão para suas distribuições de probabilidade. Portanto, devem ser corrigidas (divididas) por um fator apropriado ( $k$ ), para que correspondam a apenas um desvio padrão de suas distribuições, antes de serem usadas na avaliação da incerteza do mensurando em estudo.

Diversas distribuições de probabilidades podem ser associadas a incerteza tipo B, dentre elas podemos citar as mais comumente utilizadas: a distribuição gaussiana ou normal ( $k = 2$  a um nível de confiança de 95 % ou  $k = 3$  a um nível de confiança de 99 %), a distribuição triangular ( $k = \sqrt{6}$ ) e a distribuição retangular ( $k = \sqrt{3}$ ). A distribuição retangular é a que apresenta o menor valor de  $k$ , superestimando a incerteza padrão tipo B.

Nesse trabalho, na falta de informação a respeito da distribuição de probabilidades associada a incerteza ou outras informações fornecidas nos manuais técnicos, certificados e na literatura, foi usada a distribuição retangular. As incertezas tipo B descritas por distribuições retangulares, possuem probabilidades uniformes e todos os valores possíveis dentro do intervalo definido pelos limites superior e inferior da distribuição.

Nesse trabalho, utilizando a distribuição retangular,  $k = \sqrt{3}$ , e com o valor da incerteza máxima  $\tau_B$ , obteve-se a incerteza padrão tipo B ( $u_B$ ) pela equação:

$$u_B = \frac{\tau_B}{\sqrt{3}}$$

### INCERTEZA PADRÃO COMBINADA

A estimativa da incerteza associada ao resultado da medição é derivada de uma combinação das incertezas das estimativas das grandezas de entrada.

Supondo que as grandezas de entrada  $x_i$  não são correlacionadas, as incertezas associadas às estimativas das grandezas de entrada  $u(x_i)$ , podem ser combinadas por meio da equação abaixo para fornecer uma incerteza combinada  $u_c$ .

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)}$$

onde  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  é denominado coeficiente de sensibilidade.

Esta equação pode ser simplificada no caso em que a função  $f$  é linear de todos os  $x_i$ , o que ocorre com frequência no caso de medição direta. Nesse caso, os coeficientes de sensibilidade serão iguais a 1, e a equação pode ser escrita como:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(x_i)}$$

Então, nesse trabalho, a incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) foi obtida por meio da raiz quadrada da soma quadrática de todas as contribuições do tipo A ( $\sum u_A$ ) e do tipo B ( $\sum u_B$ ):

$$u_c = \sqrt{\sum u_A^2 + \sum u_B^2}$$

## INCERTEZA EXPANDIDA

A incerteza expandida, designada por  $U$ , visa possibilitar a declaração da incerteza do resultado de uma medição, por meio de um intervalo, associado a um nível de confiança. Essa incerteza é derivada, multiplicando-se  $u_c$  por um fator de abrangência  $k_p$ :

$$U = k_p \cdot u_c$$

Considerando um número finito de medições, o fator de abrangência  $k_p$  é determinado a partir da distribuição- $t$  (distribuição de *Student*) com  $v_{ef}$  graus efetivos de liberdade, para um nível  $p$  de confiança. O valor dos graus efetivos de liberdade,  $v_{ef}$ , a ser usado para determinar  $k_p$  é calculado por meio da fórmula simplificada de *Welch-Satterthwaite*:

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{u_A^4}{n-1}}$$

onde  $n$  é o número de observações independentes estimadas por medição e  $n-1$  corresponde aos graus de liberdade associados a  $u_A$ . Caso o valor obtido para  $v_{ef}$  não seja um número inteiro, é adotado o inteiro imediatamente inferior para  $v_{ef}$ .

Nesse trabalho o nível de confiança adotado foi de 95 %. Com esse nível de confiança e o valor de  $v_{ef}$ , o valor de  $t_{95}(v_{ef})$  foi obtido da TAB. A1. Esse valor foi usado como valor do fator de abrangência  $k_{95}$ , ou seja:

$$k_{95} = t_{95}(v_{ef})$$

Desta forma a equação pode ser escrita como:

$$U = k_{95} \cdot u_c$$

**TAB A.1** Valor de  $t_p(\nu)$  da distribuição  $t$  de *Student* para  $\nu$  graus de liberdade que define um intervalo  $-t_p(\nu)$  a  $+t_p(\nu)$  que abrange uma fração  $p$  da distribuição (INMETRO, 1998).

Graus de liberdade $\nu$	Fração p em porcentagens					
	68,27 <sup>(a)</sup>	90	95	95,45 <sup>(a)</sup>	99	99,73 <sup>(a)</sup>
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
$\infty$	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

<sup>(a)</sup> Para uma grandeza  $z$  descrita por uma distribuição normal com expectativa  $\mu_z$  e desvio padrão  $\sigma$ , o intervalo  $\mu_z \pm k\sigma$  abrange  $p = 68,27\%$ ,  $95,45\%$  e  $99,73\%$  da distribuição para  $k = 1, 2, e 3$ , respectivamente.

## **GLOSSÁRIO**

### **DE TERMOS TÉCNICOS E EXPRESSÕES USADAS**

**DESVIO PADRÃO DA MÉDIA:** Indicador estatístico da dispersão dos resultados, em relação à média, que fornece uma avaliação direta do quanto o valor médio  $\bar{X}$  pode se alterar.

**FANTOMA:** Modelo humano de material tão aproximado quanto possível da densidade e do número atômico dos tecidos vivos, usado em experiências biológicas envolvendo radiação.

**FONTE DE RADIAÇÃO** (ou simplesmente **FONTE**): Aparelho ou material que emite ou é capaz de emitir radiação ionizante.

**GRANDEZA:** Atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.

**LIMITES AUTORIZADOS:** Limites especiais estabelecidos pela CNEN, ou pela Direção da Instalação, dentro do contexto de radioproteção, que são geralmente inferiores aos limites derivados.

**LIMITES DERIVADOS:** Limites estabelecidos pela CNEN, ou pela Direção da Instalação com base em modelo realístico da situação e aprovado pela CNEN, de modo que o seu cumprimento implique em virtual certeza da observância do limite primário ou limite secundário a ele relacionado.

**LIMITES PRIMÁRIOS:** Limites estocásticos e não estocásticos, que na prática, entretanto, não podem ser medidos diretamente, não permitindo um controle adequado dos perigos criados pela radiação.

**LIMITES REGULATÓRIOS:** Relativo aos limites derivados, primários e secundários.

**LIMITES SECUNDÁRIOS:** Limites para irradiação externa e interna, relacionados aos limites primários, que permitem uma comparação mais direta com as quantidades medidas.

**PADRÃO:** Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

**QUALIDADE DE UM FEIXE DE RAIOS X:** Parâmetro utilizado para caracterizar um feixe de raios X. Este parâmetro é medido em termos da camada semi redutora (CSR) ou HVL (Half Value Layer).

**RADIAÇÃO IONIZANTE:** Qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria, ioniza direta ou indiretamente seus átomos ou moléculas.

**RADIODERMITE:** Inflamação da pele produzida pela radiação ionizante.

**RADIOPROTEÇÃO:** Conjunto de medidas que visa a proteger o homem e o meio ambiente de possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante, de acordo com os princípios básicos estabelecidos pela CNEN.

**RASTREABILIDADE:** Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas. O conceito é geralmente, expresso pelo adjetivo **RASTREÁVEL**.

**VALOR (de uma GRANDEZA):** Expressão quantitativa de uma grandeza específica, geralmente sob a forma de uma unidade de medida multiplicada por um número.

**VALOR VERDADEIRO:** Valor consistente com a definição de uma dada grandeza específica.

**VALOR VERDADEIRO CONVENCIONAL:** Valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade.