

**PAULO MÁRCIO CAMPOS DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE FEIXES DE RAIOS-X  
DIAGNÓSTICO PARA CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS**

**BELO HORIZONTE**

**2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**PAULO MÁRCIO CAMPOS DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE FEIXES DE RAIOS-X  
DIAGNÓSTICO PARA CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS**

**Dissertação submetida para aprovação  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências e Técnicas Nucleares pelo  
Departamento de Engenharia Nuclear  
da Universidade Federal de Minas  
Gerais- UFMG**

**Área de Concentração: Ciências das  
Radiações**

**Orientação: Dr.: Teógenes Augusto da  
Silva**

**Belo Horizonte  
Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG  
2008**

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Paulino  
e Marisa, à minha irmã,  
Lívia Mara, à minha  
paciente namorada  
Alessandra e à Deus.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Teógenes Augusto da Silva pelo apoio, excelente orientação e confiança nestes quatro anos como bolsista de apoio técnico e mestrado;

Ao amigo Peterson Squair pelas constantes trocas de idéias, colaborações e parceria em vários trabalhos científicos de diversas áreas do conhecimento;

Ao amigo Luiz Cláudio de Souza pela grande parceria pessoal, profissional e espiritual que muito ajudaram nos momentos mais críticos;

Aos amigos do Laboratório de Calibração de Dosímetros, Flávio Ribeiro, Jorge Machado, Paulo Gerken e Ronaldo Bittar pela colaboração e apoio técnico;

Ao amigo Carlos Manoel por tantas e valiosas ajudas no conteúdo deste e de outros trabalhos;

Aos amigos Annibal Theotônio e Elton Gomes pelas grandes contribuições, discussões acadêmicas e parcerias em trabalhos;

Ao amigo Paulo Henrique pela excelente ajuda na parte de espectrometria dos feixes de radiação;

Aos amigos do Serviço de Segurança Nuclear e Radiológica (SN2) pela força e coleguismo durante a realização deste trabalho;

Aos amigos do Laboratório de Irradiação Gama, local onde comecei como estagiário no CDTN;

Aos professores do Departamento de Engenharia Nuclear, que ajudaram na difusão do conhecimento para a sustentação do trabalho;

À Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN pelo auxílio financeiro com a bolsa de mestrado que muito ajudou na realização deste trabalho;

E a todos que de forma direta ou indireta ajudaram durante o desenvolvimento deste trabalho, muito obrigado.

## RESUMO

A metrologia das radiações ionizantes é a base para alcançar a confiabilidade metrológica nas medidas de dose em todas as áreas; também é parte de uma estrutura estabelecida para assegurar procedimentos de proteção radiológica, de modo a evitar ou minimizar os possíveis efeitos biológicos danosos causados pelas radiações ionizantes. Uma metrologia bem realizada representa o uso de equipamentos confiáveis que obedecem aos padrões de desempenho exigidos por normas aceitas no mundo inteiro. Estes instrumentos devem ser calibrados por laboratórios de metrologia sob condições muito bem definidas, como as radiações de referência estabelecidas pela International Electrotechnical Commission (IEC) com a norma 61267, para calibração de sistemas dosimétricos na área de radiodiagnóstico médico.

No Laboratório de Calibração de Dosímetros do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear foram implantadas radiações de referência da IEC identificadas como RQR2, RQR6 e RQR10, com tensões de 40, 80 e 150 kV respectivamente e suas características foram analisadas através das medidas dos parâmetros destes feixes, como espectros de energia e tensões de pico, filtrações adicionais, 1ª camada semi-redutora e coeficiente de homogeneidade, para condições de filtros adicionais de alumínio com purezas de 99,425 % e 99,999 %; também foram analisadas a filtração inerente do tubo, uniformidade e tamanho do campo de raios-x.

Medições do kerma no ar foram feitas com uma câmara de ionização, que teve sua confiabilidade demonstrada por meio de testes de repetitividade e reprodutibilidade das respostas. Em 50 conjuntos de medidas, o maior desvio padrão para 10 leituras consecutivas foi de 0,19 %; a maior diferença em relação à média dos valores obtidos em uma geometria fixa de irradiação foi de 0,80 % com um desvio padrão geral de 0,23 %.

Os resultados mostraram que o uso de filtros de diferentes purezas não causou influência relevante nos espectros dos feixes de radiação de referência. Uma câmara

de ionização também foi calibrada em comparação a uma câmara padrão de referência em todas as radiações de referência implantadas e as fontes de incerteza mais relevantes foram estimadas. Verificou-se que a incerteza expandida para o coeficiente de calibração foi de 1,50 % com um fator de abrangência  $k$  igual a 2 para um intervalo de confiança de 95,45 %, principalmente devido à incerteza de 0,58 % causada pelo sistema de posicionamento das câmaras de ionização.



## ABSTRACT

Ionizing radiation metrology is the base to achieve reliable dose measurements in all areas; it is also part of the framework that is established to assure radiation protection procedures in order to avoid or minimize the harmful biological effect that may be caused by ionizing radiation. A well done metrology means the use of reliable instruments that comply with standard performance requirements worldwide accepted. Those instruments are expected to be calibrated by Metrology Laboratories under well defined conditions. The International Electrotechnical Commission (IEC) in Standard 61267 established the reference radiations for medical diagnostic x-ray equipment that are recommended to be used for calibrating dosimetric systems for diagnostic dosimetry.

In this work, x-ray beam qualities were established in a Calibration Laboratory and their characteristics were analyzed through the measurement of beam parameters like inherent tube filtration, beam uniformity and field size, energy spectra and peak voltage for additional filtration with 94.425% and 99.999% purity filters. Also, the first half-value layer and the homogeneity coefficient were measured for the three RQR2, RQR6 and RQR10 IEC beam qualities and they were analyzed according to the IEC standard.

Air-kerma measurements were carried out with an ionization chamber that had its reliability confirmed through repetitivity and reproducibility reading tests. In 50 sets of measurements the maximum standard deviation found of 10 successive readings was 0.19 %; the maximum shift of the reading mean value at a fixed geometry condition was 0.80 % with an overall standard deviation of 0.23 %.

Results showed that the use of different purity filters did not cause a relevant influence on the beam energy spectra. An ionization chamber was also calibrated against a standard dosimeter in all implemented reference radiations and the relevant sources of uncertainties were estimated. Calibration could be done with an expanded uncertainty of 1.50% for a coverage factor of 2 at a 95.45 % confidence level, mainly

due to the uncertainty of 0.58% caused by the positioning set-up of the ionization chamber.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado de funcionamento de uma câmara de ionização. ...	24
Figura 2. Espectro dos raios-x com a influência da filtração inerente da ampola.....	27
Figura 3. Espectro discreto dos raios-x. ....	28
Figura 4. Espectro formado pelos raios-x de Bremsstrahlung e característicos.....	28
Figura 5. Espectro visualizado através do software PMCA V 2.0.1.....	30
Figura 6. (a) Tubo de raios-x Pantak Seifert – ISOVOLT HS 320. (b) Tubo de raios-x Pantak Seifert com blindagem. ....	44
Figura 7. (a) Câmara de ionização Radcal modelo 10X5-6. (b) Eletrômetro Radcal modelo 9015.....	45
Figura 8. Dimensões em milímetros da câmara Radcal 10X5-6. ....	45
Figura 9. Câmara de ionização Radcal modelo RC-6. ....	46
Figura 10. Dimensões em milímetros da câmara Radcal RC6.....	46
Figura 11. Dependência energética das câmaras de ionização 10X5-6 e RC6 (RADCAL, 1994, 2007).....	47
Figura 12. Eletrômetro Keithley modelo 6517-A.....	47
Figura 13. Câmara de Monitoração PTW-Freiburg TN34014.....	48
Figura 14. Filtros de alta pureza Goodfellow (99,999 % de alumínio). ....	49
Figura 15. Filtros de baixa pureza (99,425 % de alumínio). ....	49
Figura 16. Espectrômetro XR-100T CdTe e analisador multicanal. ....	50
Figura 17. Diagrama esquemático da montagem do detector CdTe e seus componentes.....	50
Figura 18. Fonte de $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ emissora de radiação beta PTW1995.....	51
Figura 19. Fontes de $^{133}\text{Ba}$ e $^{241}\text{Am}$ da fabricante Isotop. ....	51
Figura 20. Transdutor de pressão Setra conectado ao multímetro digital Tektronix. ....	52
Figura 21. Esquema de posicionamento do suporte dos atenuadores e do colimador adicional.....	53
Figura 22. Perfil do sistema de posicionamento com o suporte dos filtros.....	54
Figura 23. Sistema de posicionamento da câmara de ionização para o estudo do campo de raios-x.....	58
Figura 24. Esquema do posicionamento centralizado da câmara de ionização para o estudo do campo de radiação. ....	59

Figura 25. Exemplo da matriz utilizada para o posicionamento da câmara de ionização. ....	59
Figura 26. Esquema de posicionamento utilizado para a implantação das RQR's. ..	62
Figura 27. Exemplo de determinação da filtração a ser adicionada ao tubo de raios-x para obtenção da RQR. ....	63
Figura 28. Esquema de posicionamento das fontes para calibração do espectrômetro. ....	66
Figura 29. Esquema de posicionamento do espectrômetro. ....	67
Figura 30. Esquema dos colimadores do espectrômetro. ....	68
Figura 31. Posicionamento das câmaras de ionização para o procedimento de calibração. ....	70
Figura 32. Curva de atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo integrado. ....	76
Figura 33. Curva de atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo taxa. ....	76
Figura 34. Estabilidade da resposta da câmara RC6 em função de um mesmo estímulo gerado pela fonte padrão. ....	80
Figura 35. Correntes de fuga do sistema câmara-eletrômetro. ....	80
Figura 36. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco grosso para a tensão de 80 kV. ....	82
Figura 37. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco fino para a tensão de 80 kV. ....	83
Figura 38. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco grosso e 2,98 mmAl para a tensão de 80kV, correspondente à RQR6. ....	84
Figura 39. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco fino e 2,98 mmAl para a tensão de 80kV, correspondente à RQR6. ....	85
Figura 40. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 2 com filtros de alta pureza. ....	87
Figura 41. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 2 com filtros de baixa pureza. ....	88

Figura 42. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 6 com filtros de alta pureza. ....	93
Figura 43. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 6 com filtros de baixa pureza. ....	94
Figura 44. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 10 com filtros de alta pureza. ....	98
Figura 45. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 10 com filtros de baixa pureza. ....	100
Figura 46. Espectro experimental do amerício-241 com a indicação dos picos de energia utilizados na calibração do espectrômetro.....	102
Figura 47. Espectro experimental do bário-133 com a indicação dos picos de energia utilizados na calibração do espectrômetro.....	103
Figura 48. Espectro experimental do cobalto-57 com a indicação dos picos de energia utilizados na calibração do espectrômetro.....	103
Figura 49. Centróide do pico referente à energia de 20,8 keV do amerício-241. ....	104
Figura 50. Retas de calibração para o detector CdTe XR100 Amptek ajustada por uma função linear.....	105
Figura 51. Espectros da RQR 2 com filtros de alta e de baixa pureza. ....	106
Figura 52. Espectros da RQR 6 com filtros de alta e de baixa pureza. ....	107
Figura 53. Espectros da RQR 10 com filtros de alta e de baixa pureza. ....	108
Figura 54. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR2 com filtros de alta pureza. ....	109
Figura 55. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR2 com filtros de baixa pureza. ....	110
Figura 56. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR6 com filtros de alta pureza. ....	111
Figura 57. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR6 com filtros de baixa pureza. ....	111
Figura 58. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR10 com filtros de alta pureza. ....	112

Figura 59. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR10 com  
filtros de baixa pureza. .... 113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Requisitos para implantação das radiações de referência RQR (IEC, 2005). .....	37
Tabela 2. Relação das fontes radioativas utilizadas, energias de emissão e natureza da radiação (PEREIRA, 2004). .....	65
Tabela 3. Teste de determinação da influência da radiação espalhada pelo suporte dos filtros, a 60 kV. ....	74
Tabela 4. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo kerma no ar integrado, para diferentes espessuras de filtros de alumínio. ....	75
Tabela 5. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo taxa de kerma no ar, para diferentes espessuras de filtros de alumínio. ....	75
Tabela 6. Correlação entre a CSR, a 60 kV, e a filtração inerente do tubo de raios-x (ISO, 1996-b) .....	78
Tabela 7. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR2 com filtros de alta pureza. ....	87
Tabela 8. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR2 com filtros de baixa pureza. ....	88
Tabela 9. Parâmetros de confirmação da implantação da radiação de referência RQR2. ....	89
Tabela 10. Fontes de incerteza da 1ª CSR da RQR2 implantada com filtros de alta pureza. ....	90
Tabela 11. Fontes de incerteza do CH da RQR2 implantada com filtros de alta pureza. ....	91
Tabela 12. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR6 com filtros de alta pureza. ....	92
Tabela 13. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR6 com filtros de baixa pureza. ....	93
Tabela 14. Resultados da confirmação da implantação da radiação de referência RQR 6. ....	95
Tabela 15. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR10 com filtros de alta pureza. ....	97

Tabela 16. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR10 com filtros de baixa pureza. ....	99
Tabela 17. Resultados da confirmação da implantação da radiação de referência RQR 10. ....	101
Tabela 18. Relação entre a energia dos fótons coletados por canal de aquisição de dados.....	105
Tabela 19. Coeficientes de calibração da câmara 10X5-6 e incertezas associadas em função dos parâmetros característicos de cada radiação de referência. ....	114
Tabela 20. Parâmetros relativos às incertezas para o coeficiente de calibração da câmara 10X5-6 irradiada na radiação de referência RQR2 com filtros de alta pureza.....	115



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAPM – American Association of Physics in Medicine  
CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
CH – Coeficiente de Homogeneidade  
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear  
CRCN – Centro Regional de Ciências Nucleares  
CSR – Camada Semi-Redutora  
CTDI – Índice de dose em tomografia computadorizada  
DAP – Produto dose área  
Dep. – Dependência  
IAEA – International Atomic Energy Agency  
IEC – International Electrotechnical Commission  
IEE – Instituto de Eletrotécnica e Energia  
IEN – Instituto de Engenharia Nuclear  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial  
INMRI – Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti  
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria  
ISO – International Organization Standardization  
LABELO – Laboratórios Especializados em Eletro-Eletrônica Calibração e Ensaios  
LAPRE – Laboratório de Pressão  
LCD – Laboratório de Calibração de Dosímetros  
LCR – Laboratório de Ciências Radiológicas  
LNMRI – Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes  
PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
SBM – Sociedade Brasileira de Metrologia  
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco  
VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia  
VISA – Vigilância Sanitária

## LISTA DE SÍMBOLOS

$^{133}\text{Ba}$  – Bário-133

$^{241}\text{Am}$  – Amerício-241

$^{57}\text{Co}$  – Cobalto-57

$^{90}\text{Sr}$  – Estrôncio-90

$^{90}\text{Y}$  – Ítrio-90

CdTe – Telureto de Cádmio

CdZnTe – Telureto de Cádmio com Zinco

$E_c$  – Energia cinética

$E_L$  – Energia de ligação

$F_i$  – Filtração Inerente

$f_{T,P}$  – Fator de correção para a densidade do ar

$h$  – Constante de Planck

$k$  – Fator de abrangência

$L_i$  – Leitura de uma medição em mGy

$K_{ar}$  – Kerma no ar

$k_{Q,Q_0}$  – Fator de correção para a radiação de referência

$n$  – Quantidade de leituras realizadas

$N_k$  – Coeficiente de calibração

$P$  – Pressão atmosférica em kPa

$T$  – Temperatura ambiente em °C

$U$  – Incerteza expandida

$U_A$  – Fonte de incerteza do tipo A

$U_B$  – Fonte de incerteza do tipo B

$U_C$  – Incerteza combinada

$\nu$  – Frequência da radiação eletromagnética

$\nu_{\text{eff}}$  – Grau de liberdade efetivo

$\nu_i$  – Grau de liberdade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
2.1. DETECÇÃO DA RADIAÇÃO .....	23
2.1.1. Câmara de Ionização .....	23
2.1.2. Semicondutores .....	24
2.2. ESPECTROMETRIA DE FÓTONS .....	25
2.3. GRANDEZA DOSIMÉTRICA DE INTERESSE .....	30
2.4. FILTROS OU ATENUADORES.....	31
2.5. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....	31
2.6. RADIAÇÕES DE REFERÊNCIA .....	32
2.6.1. <i>Introdução</i> .....	32
2.6.2. <i>Tensão de Pico Prático</i> .....	34
2.6.3. <i>Camada Semi-Redutora e Coeficiente de Homogeneidade</i> .....	35
2.6.4. <i>Radiações de Referência</i> .....	36
2.7. CÁLCULO DAS INCERTEZAS .....	38
2.7.1. <i>Formas de Distribuição de um Conjunto de Valores</i> .....	38
2.7.2. <i>Tipos de Incerteza e Métodos de Cálculo</i> .....	39
2.7.2.1. Incertezas do Tipo A.....	39
2.7.2.2. Incertezas do Tipo B.....	40
2.7.2.3. Combinação das Incertezas .....	41
2.7.2.4. Fator de abrangência k.....	42
<b>3. MATERIAIS.....</b>	<b>44</b>
3.1. EQUIPAMENTO DE RAIOS-X.....	44
3.2. CÂMARAS DE IONIZAÇÃO E ELETRÔMETROS.....	44
3.3. CÂMARA DE MONITORAÇÃO .....	47
3.4. FILTROS DE ALUMÍNIO .....	48
3.5. ESPECTRÔMETRO DE CdTe .....	49
3.6. FONTES RADIOATIVAS.....	50
3.7. DEMAIS EQUIPAMENTOS .....	52

<b>4. MÉTODOS</b> .....	<b>53</b>
4.1. DETERMINAÇÃO DA FILTRAÇÃO INERENTE .....	53
4.2. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DA RESPOSTA DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO RC6 .....	55
4.3. VERIFICAÇÃO DA UNIFORMIDADE E DO TAMANHO DO CAMPO DE RADIAÇÃO .....	58
4.4. IMPLANTAÇÃO DAS RADIAÇÕES DE REFERÊNCIA DA IEC .....	61
4.5. ESPECTROMETRIA DAS RADIAÇÕES DE REFERÊNCIA .....	65
4.5.1. <i>Calibração do Sistema de Espectrometria</i> .....	65
4.5.2. <i>Detecção dos Espectros de Energia</i> .....	66
4.5.3. <i>Verificação da Tensão de Pico (kVp)</i> .....	68
4.6. CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO 10X5-6 .....	69
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>74</b>
5.1. DETERMINAÇÃO DA FILTRAÇÃO INERENTE .....	74
5.2. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DA RESPOSTA DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO RC6 .....	79
5.3. VERIFICAÇÃO DA UNIFORMIDADE E DO TAMANHO DO CAMPO DE RADIAÇÃO .....	81
5.4. IMPLANTAÇÃO DAS RADIAÇÕES DE REFERÊNCIA DA IEC .....	86
5.4.1. <i>Implantação da RQR 2 com filtros de alta e baixa pureza</i> .....	86
5.4.2. <i>Implantação da RQR 6 com filtros de alta e baixa pureza</i> .....	91
5.4.3. <i>Implantação da RQR 10 com filtros de alta e baixa pureza</i> .....	96
5.5. ESPECTROMETRIA DAS RADIAÇÕES DE REFERÊNCIA .....	102
5.5.1. <i>Calibração do Sistema de Espectrometria</i> .....	102
5.5.2. <i>Detecção dos Espectros de Energia</i> .....	106
5.5.3. <i>Verificação da Tensão de Pico</i> .....	109
5.6. CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO 10X5-6 .....	114
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>116</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>118</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A metrologia das radiações ionizantes é a base para alcançar a confiabilidade nas medidas de dose em indivíduos ocupacionalmente expostos, em pacientes submetidos a exames de radiodiagnóstico ou radioterapia e no meio ambiente (visando estimar as doses em membros do público). O objetivo da medida confiável das doses é estabelecer ou assegurar procedimentos de radioproteção para fins de evitar os efeitos biológicos danosos causados pelas radiações X, beta, gama e outras.

Para que a metrologia das radiações seja bem realizada é preciso que se utilizem equipamentos detectores de radiação confiáveis, o que se torna possível desde que estes detectores estejam devidamente calibrados e atendam aos padrões de desempenho estabelecidos por normas. Há várias normas internacionais que estabelecem as condições para que detectores possam operar com confiabilidade metrológica para um propósito bem definido (AAPM, 2001; IEC, 2005; ISO, 1996-a).

Atualmente os laboratórios de metrologia das radiações ionizantes em todo o mundo buscam garantir uma coerência metrológica entre os feixes de raios-x, através da adoção das radiações de referência estabelecidas por normas internacionais, tal como a International Electrotechnical Commission - IEC para a área de radiodiagnóstico (IEC, 2005), a International Organization Standardization - ISO para a Proteção Radiológica (ISO, 1996-a) e a American Association of Physics in Medicine – AAPM para a área de radioterapia e radiobiologia (AAPM, 2001). Esta padronização internacional dos feixes de radiação permite que um equipamento seja calibrado e analisado em diferentes laboratórios sob as mesmas condições e características de irradiação.

Hoje os laboratórios de metrologia das radiações no mundo utilizam, entre outras, as determinações das normas da IEC para o estabelecimento de seus feixes de raios-x de referência, como é o caso do Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB da Alemanha, laboratório padrão primário, o Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti da Itália, dentre outros.

A base metrológica no Brasil para radiodiagnóstico é dada pela Rede Metrológica Brasileira, composta por oito Laboratórios:

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN – Belo Horizonte

Centro Regional de Ciências Nucleares – CRCN – Recife

Instituto de Eletrotécnica e Energia – IEE – São Paulo

Instituto de Engenharia Nuclear – IEN – Rio de Janeiro

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – São Paulo

Laboratório de Ciências Radiológicas – LCR – Rio de Janeiro

Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes – LNMRI – Rio de Janeiro

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE – Recife

Tal rede já está bem estabelecida quanto à calibração de dosímetros em feixes de radiação gama e, apoiada e integrada por projetos nacionais, busca estabelecer a calibração de dosímetros em feixes de raios-x no nível de radioproteção, radiodiagnóstico e radioterapia.

Em diagnóstico, as radiações de referência são feixes de raios-x que possuem alguns parâmetros bem definidos, tais como a camada semi-redutora, o coeficiente de homogeneidade, a tensão de pico, o espectro de energias e outros.

Estes parâmetros devem ser verificados para cada um dos cinquenta e oito feixes de referência estabelecidos pela IEC, sendo nove RQR (qualidades de radiação em radiodiagnóstico convencional), nove RQA (qualidades de radiação com a atenuação do feixe após a adição de alumínio), três RQC (qualidades de radiação com a atenuação do feixe após a adição de cobre), três RQT (qualidades de radiação para Tomografia Computadorizada), nove RQN e nove RQB (qualidades de radiação com a presença de simuladores ou fantomas preenchidos por água) e dezesseis qualidades referentes à mamografia.

É preciso estender a base metrológica à comunidade científica, médica e industrial, ofertando serviços de calibração de dosímetros em feixes de raios-x diagnóstico de referência. Para isto, a confiabilidade metrológica da implementação das radiações

de referência deve ser demonstrada e documentada por meio de testes de desempenho e de intercomparações tanto nos dosímetros padrões quanto nos campos de radiação de referência.

A implantação de programas para a melhoria da saúde do povo brasileiro é o objetivo principal do Governo, estendendo os esforços para as aplicações das radiações na área médica. A portaria do Serviço de Vigilância Sanitária – SVS 453/98 estabelece as diretrizes de Proteção Radiológica na área de radiodiagnóstico, as quais os estabelecimentos de saúde deverão se adequar e estabelece, também, que cabe à Vigilância Sanitária (VISA) a inspeção da obediência da referida Portaria (ANVISA, 1998).

Com o objetivo de proteção radiológica, são realizados vários testes para verificação do desempenho de equipamentos emissores de radiação X, além de testes para verificação do nível de radiação a que estão expostos os pacientes, trabalhadores e indivíduos do público (DA SILVA *et al*, 2000).

Os equipamentos utilizados nos referidos testes têm que estar devidamente calibrados em campos de raios-x e as incertezas de medição calculadas e propagadas de forma correta, uma vez que esta determinação influencia na qualidade da apresentação dos resultados de medição (INMETRO, 2000, 2003; BIPM, 1998; IAEA, 2000).

O Laboratório de Calibração de Dosímetros do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear fornece treinamento para os profissionais envolvidos na área de laudos radiométricos (que envolvem os testes de qualidade dos equipamentos de raios-x e o levantamento dosimétrico visando estimar a dose nos trabalhadores ocupacionalmente expostos e no público em geral) (DA SILVA *et al*. 2000). O laboratório tem esta preocupação metrológica estando bem estabelecido com relação à calibração em feixes de raios gama, faltando um estudo mais abrangente na área de calibração em raios-x diagnóstico.

O objetivo deste trabalho é investigar a metodologia e analisar os parâmetros que estabelecem as radiações de referência em raios-x diagnóstico, especificamente a

filtração inerente do equipamento de raios-x, a camada semi-redutora, o coeficiente de homogeneidade, o espectro do feixe de radiação e a tensão de pico. Busca-se também, estimar a contribuição dos mesmos no cálculo das incertezas na calibração de dosímetros.

A norma a ser aplicada na realização deste trabalho é a IEC 61267, que trata das radiações de referência voltadas para o radiodiagnóstico médico convencional, tomografia computadorizada e mamografia; o principal resultado será a implantação do procedimento tornando-se possível a calibração e estudo mais amplo de diversos instrumentos detectores de radiação utilizados na área de radiodiagnóstico.



## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Detecção da Radiação**

Um dispositivo capaz de medir a intensidade ou simplesmente indicar a presença de radiação é chamado de detector. A radiação eletromagnética interage com os átomos do meio arrancando elétrons; medidas da quantidade de elétrons arrancados em certo meio podem fornecer valores da quantidade de radiação que interagiu neste. Para este tipo de medição existem vários tipos de detectores, cada um com suas características e funções.

Dentre as principais características que um detector deve possuir, algumas são de suma importância como a exatidão, que indica o grau de concordância dos resultados com o valor considerado como verdadeiro; a repetitividade do detector, uma vez que sob as mesmas condições de medição (fonte de radiação, distância da fonte, tempo de exposição etc.) o detector deveria responder com o mesmo valor (VIM, 2007); os detectores também devem ser reproduzíveis, isto é, responder de forma adequada, apesar de algumas variações de condições de medição, devem ser estáveis não perdendo a exatidão da resposta com o passar do tempo, além de serem sensíveis e eficientes em relação ao tipo de radiação que se deseja medir (BAPTISTA NETO, 2005).

#### **2.1.1. Câmara de Ionização**

Dentre os vários tipos de detectores gasosos, as câmaras de ionização destacam-se pela grande estabilidade ao longo do tempo, por isso são muito utilizadas como instrumentos de referência na calibração de outros detectores de radiação.

Um esquema simples do funcionamento destes equipamentos é mostrado na Figura 1.

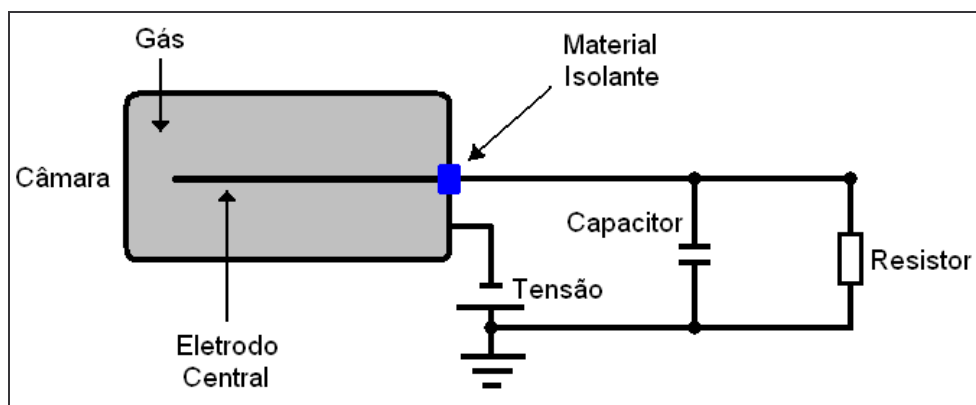


Figura 1. Esquema simplificado de funcionamento de uma câmara de ionização.

Neste esquema as paredes da câmara, que contêm um gás, funcionam como um catodo, o eletrodo central (anodo) está fixado na câmara com um material isolante elétrico e entre a câmara e o eletrodo central é aplicada uma diferença de potencial através de um resistor.

O processo de detecção ocorre quando os fótons de radiação eletromagnética penetram no interior da câmara e ionizam o gás (que pode ser o próprio ar), fazendo com que elétrons sejam acelerados em direção ao eletrodo central e os íons positivos em direção à câmara, gerando uma corrente elétrica proporcional à quantidade de fótons que interagiram na câmara (KNOLL, 2000).

### 2.1.2. Semicondutores

Os materiais semicondutores são pequenos cristais que respondem instantaneamente à radiação; eles produzem sinais relativamente grandes com baixas quantidades de interações da radiação, são rígidos e não requerem correção de pressão atmosférica. Na rede cristalina destes materiais pode-se dizer de forma simplificada que existem três bandas de energia em relação à condutividade de elétrons: a banda de valência (de baixas energias) onde os elétrons normalmente se encontram quando o material não está excitado, a banda de condução por onde os

elétrons migram-se normalmente e uma banda proibida, local este que os elétrons não podem ficar (IAEA, 2007).

A largura em energia da banda proibida de materiais semicondutores é tal que, em algumas circunstâncias, os elétrons podem sair da banda valência e chegar à banda de condução, comportando-se como um condutor.

Os dispositivos de semicondução mais simples são diodos baseados em uma junção p-n. Quando a radiação interage com o semicondutor, são induzidos pares de lacunas ou buracos e elétrons; este fato torna a junção condutiva e a corrente aumenta com a taxa de produção de íons. O tamanho do sinal gerado depende das propriedades ionizantes da radiação e em sua capacidade de penetrar à junção. A quantidade de ionização na junção também pode depender da área de seção de choque desta em relação à incidência do feixe. Assim, pode haver dependência em relação à direção do feixe e em relação à sua energia (IAEA, 2007).

Quando não há irradiação do diodo, termina-se a produção de íons em seu interior e este recupera seu estado original, excetuando-se alterações permanentes nas propriedades estruturais de sua junção p-n, que podem ocorrer quando a taxa de interações é muito alta, como no caso dos cristais semicondutores de telureto de cádmio – CdTe (KRMAR et al. 2006).

## **2.2. Espectrometria de Fótons**

Em se tratando de radiações eletromagnéticas, devido ao seu comportamento ondulatório, estas podem penetrar nos materiais a grandes distâncias sem proporcionar uma única interação. No caso dos raios-x, mais especificamente, é importante que sejam delimitados fatores como a produção e a interação com o meio através de alguns efeitos como o fotoelétrico, Compton, etc (EVANS, 1955).

O efeito fotoelétrico ocorre quando a radiação eletromagnética transfere toda sua energia a um único elétron orbital de um átomo alvo (TAHUATA *et al*, 1999); ou seja,

a radiação deixa de existir e o elétron orbital é expelido de seu átomo de origem com energia cinética  $E_C$  bem definida dada pela Equação 1:

$$E_C = h \cdot \nu - E_L \quad (1)$$

onde:  $E_C$  é a energia cinética do elétron ejetado;

$h$  é a constante de Planck

$\nu$  é a frequência da radiação eletromagnética incidente;

$E_L$  representa a energia de ligação do elétron ao átomo.

Este efeito é importante quando se objetiva realizar espectrometria de feixes de radiação, pois o fóton de radiação cede toda sua energia ao elétron, bastando, então, quantificar esta energia através do elétron ejetado.

O efeito Compton ocorre quando um fóton de radiação interage com elétrons de átomos alvo com baixas energias de ligação. Estes elétrons, ao contrário do efeito fotoelétrico, recebem somente parte da energia do fóton incidente e são ejetados de seus átomos com energias que podem variar de quase zero a um valor máximo e o fóton incidente muda sua trajetória de propagação (ATTIX, 2004; EISBERG, 1979).

Em radiodiagnóstico este efeito pode contribuir de forma negativa ao resultado esperado, em se tratando da qualidade de imagem (BUSHBERG et al.; 1994); em espectrometria, o fato de gerar fótons espalhados, pode levar à perda de informações sobre a energia da radiação que chega ao detector (MIYAJIMA et al.; 2002).

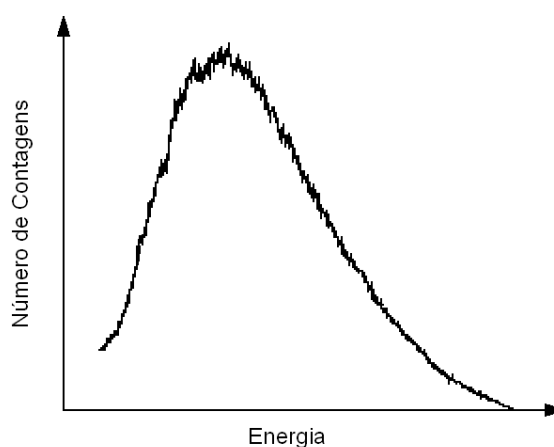
Quando partículas carregadas sofrem uma desaceleração perdem parte de sua energia cinética, seja sob a forma de calor, seja sob a produção de ondas eletromagnéticas, ou fótons, denominadas raios-x.

Basicamente, os raios-x são produzidos quando o alvo de um material (anodo) é bombardeado com elétrons acelerados a altas energias, que é o esquema de um tubo de raios-x. Quando os elétrons passam próximos aos núcleos dos átomos do

alvo eles sofrem uma grande desaceleração, dando origem aos raios-x de freamento ou Bremsstrahlung (NOGUEIRA, 1997).

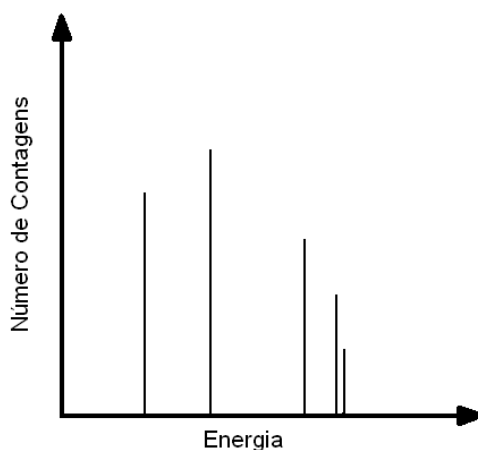
Na produção dos raios-x, os elétrons podem passar perto ou não dos núcleos dos átomos do alvo (anodo), assim os fótons produzidos, poderão assumir qualquer valor desde quase zero, até um valor máximo dado pela energia do elétron. Portanto, apresenta-se um espectro contínuo de raios-x. Este espectro tem nome de espectro limpo dos raios-x.

É importante frisar que este espectro só seria obtido se fosse possível determiná-lo sem a influência da filtração inerente da ampola de raios-x (SCAFF, 1979) e do material do espectrômetro utilizado na medição, que absorvem certa quantidade de fótons, principalmente os de baixa energia, modificando tal espectro (Figura 2).



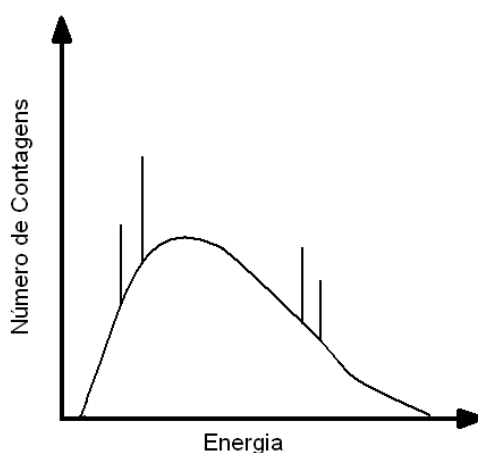
**Figura 2. Espectro dos raios-x com a influência da filtração inerente da ampola.**

Outros tipos de raios-x muito importantes em radiodiagnóstico são os raios-x característicos, que são formados quando um elétron de uma camada externa do átomo ocupa uma lacuna em uma camada interna neste átomo. Esta lacuna pode ser originada quando um elétron com energia suficientemente alta se choca com o elétron da camada mais interna do átomo. Haverá uma ionização e este átomo ionizado volta ao seu estado normal, preenchendo a lacuna criada pelo elétron ejetado, com elétrons mais externos até que todas as lacunas sejam preenchidas. Estes tipos de raios-x darão origem ao chamado espectro de linhas (Figura 3).



**Figura 3. Espectro discreto dos raios-x.**

Como a emissão de radiação característica não é um fenômeno isolado, a configuração do espectro total de uma ampola de raios-x (Bremsstrahlung + Característico) passa a ser como mostra a Figura 4.



**Figura 4. Espectro formado pelos raios-x de Bremsstrahlung e característicos.**

Muitas informações contidas nas representações gráficas destes espectros podem ser de especial interesse em radiodiagnóstico, tais como os valores das abscissas que representam a energia dos fótons e podem revelar a tensão de pico do equipamento emissor dos raios-x (POTIENS e CALDAS, 2001 a,b).

Um espectro de distribuição de energia de fótons não é o resultado direto de uma espectroscopia. Seu resultado direto é uma distribuição de alturas de pulsos,

portanto deve-se fazer uma associação de uma altura de pulso elétrico em energia do fóton.

Este processo envolve desde a detecção do fóton e sua transformação em um sinal elétrico, que é registrado, até a medida de um espectro de fontes com emissões de fótons de energias conhecidas de modo a calibrar o espectrômetro (FREITAS, 2005).

O fóton de radiação interage com o detector transferindo toda ou parte de sua energia para o cristal semicondutor. Esta absorção de energia do fóton leva à formação de pares elétron/buraco no cristal.

A quantidade de pares elétron/buraco gerados em cada interação é definida pelo valor de energia transferida do fóton em relação ao valor médio da energia necessária para a formação de um par elétron/buraco. Ao se aplicar um campo elétrico no cristal é possível coletar as várias cargas geradas em cada interação. Este sinal passa através de um pré-amplificador que produz um pulso, no qual sua amplitude é proporcional ao valor da carga integrada após uma interação.

Posteriormente este pulso gerado passa através de um amplificador que além de aumentá-lo, melhora sua relação sinal/ruído. Em seguida um analisador multicanal classifica os pulsos segundo sua amplitude, integrando-os. Estas informações são enviadas a um computador com um software capaz de mostrar graficamente a distribuição dos pulsos, conforme Figura 5, que mostra a interface gráfica do software PMCA versão 2.0.1 da Amptek.

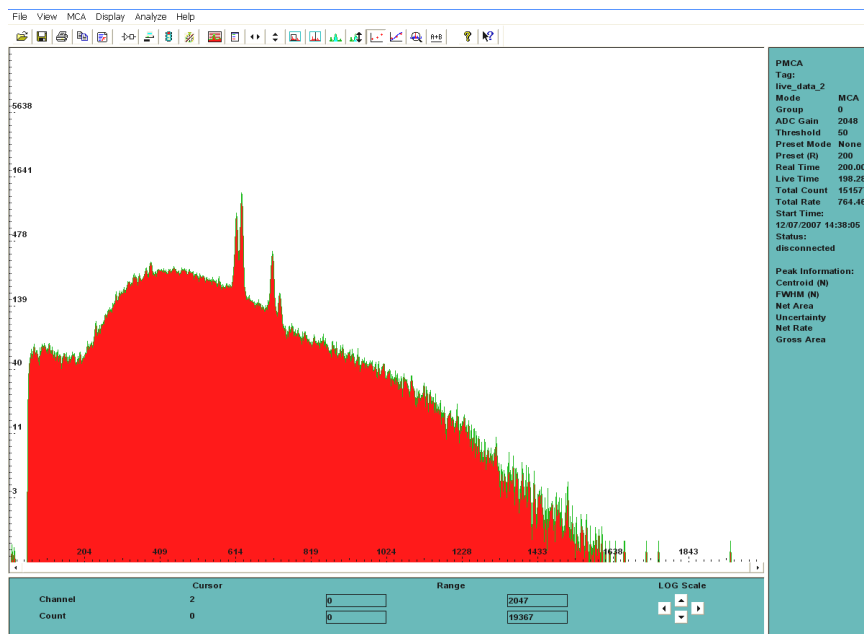


Figura 5. Espectro visualizado através do software PMCA V 2.0.1.

### 2.3. Grandeza Dosimétrica de Interesse

A grandeza dosimétrica de interesse para as medidas de radiação envolvidas na realização da deste trabalho é o Kerma “*kinetic energy released per unit of mass*”, que é definido como sendo a razão entre  $dE_{tr}$  e  $dm$ , onde  $dE_{tr}$  é a soma da energia cinética inicial de todas as partículas carregadas liberadas por partículas sem carga em um volume de massa  $dm$  (ICRU, 1980; SOARES, 2001) ou seja:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2)$$

A unidade de kerma é  $J.kg^{-1}$  que recebe o nome especial de gray (Gy).



## **2.4. Filtros ou Atenuadores**

Espessuras de materiais colocadas propositadamente diante de um feixe de raios-x para que parte de sua radiação seja absorvida e que seu espectro seja modificado, são chamados de filtros ou atenuadores.

Quando a intensidade da radiação é reduzida pela absorção de um intervalo particular de sua energia, o processo é chamado de filtração.

O feixe primário de raios-x emitidos do alvo tem necessariamente que passar através da parede de vidro da ampola, óleo e outros materiais antes de sair totalmente do sistema da ampola. Portanto, o feixe de radiação sofrerá uma filtração inevitável, é a chamada filtração inerente da ampola (SCAFF, 1979).

Para a realização dos procedimentos definidos pela IEC, é necessária a utilização de filtros de várias espessuras com o objetivo de caracterizar o feixe de cada equipamento de raios-x.

## **2.5. Calibração de Equipamentos**

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões (INMETRO, 2007).

Os objetivos primários da calibração são de assegurar que o instrumento esteja funcionando corretamente e, conseqüentemente, respondendo satisfatoriamente aos propósitos da monitoração, além de determinar a indicação do instrumento para uma

dada grandeza, sob condições padrão controladas e executar o ajuste do instrumento, se possível (BAPTISTA NETO, 2005).

## **2.6. Radiações de Referência**

### 2.6.1. Introdução

Algumas comissões e organizações internacionais são responsáveis por definir e regulamentar vários aspectos de diferentes áreas de aplicação; para a área das radiações pode-se citar a ISO, que define aplicações para a parte de proteção radiológica (ISO, 1996), a AAPM, para a área de radiobiologia e radioterapia (AAPM, 2001) e a IEC, que define condições padrão para a área de radiodiagnóstico (IEC, 2005).

A IEC especifica, também, o desempenho e alguns requisitos relacionados à construção de dosímetros diagnósticos utilizados para medidas de taxa de kerma no ar ou kerma no ar integrado em campos de radiação usados em radiografia convencional, mamografia, fluoroscopia e tomografia computadorizada, para equipamentos de raios-x que possuam geradores de até 150 kV de tensão (IEC, 1997).

Laboratórios de todo o mundo utilizam as radiações de referência, o INMRI na Itália, por exemplo, acompanhou a resposta de suas câmaras de ionização de ar livre (*Free Air*) em feixes de raios-x diagnóstico da ISO e IEC para fins de pesquisa e calibração de detectores (INMRI, 2003).

GREEN et al. forneceram calibração e acompanharam a respostas de medidores de raios-x a nível diagnóstico convencional e de mamografia em feixes de referência da IEC e ISO, através de seus sistemas de medições rastreáveis a padrões primários do PTB e NPL (GREEN et al.; 1996).

ANKERHOLD pesquisou a dependência energética de câmaras de ionização padrões secundários para a medida de grandezas de proteção radiológica através medições das radiações de referência da ISO, verificando resultados satisfatórios para altas energias (40 a 1250 keV) e o aumento da dependência para energias abaixo dos 40 keV (ANKERHOLD, 2005).

RANNIKKO mostrou que para a estimativa da dose em pacientes submetidos à radiologia intervencionista, um medidor da grandeza DAP "*dose area product*" é mais recomendado que um medidor de kerma no ar calibrados nos feixes de radiação da IEC (RANNIKKO, 2001).

BOCHUD et al. também utilizaram feixes de radiação de referência para a verificação de fatores importantes na calibração de câmaras de ionização do tipo lápis utilizadas nas medidas de CTDI - índice de dose em tomografia computadorizada (BOCHUD et al., 2001)

No Brasil, cada vez mais pesquisas vêm sendo realizadas com a utilização de radiações de referência; assim como Baptista Neto que mostrou a viabilidade da implantação de radiações de referência da ISO e a calibração de dosímetros pessoais em um equipamento de raios-x médico convencional (BAPTISTA NETO, 2005).

Maia e Caldas compararam seus valores experimentais de camada semi-redutora (CSR) com os valores exigidos pela IEC de 1994; elas encontraram diferenças nos valores finais, mesmo após a realização de alguns ajustes recomendados por norma. Foram verificadas dificuldades na padronização dos feixes de radiação recomendados por esta norma, que foi revisada e substituída pela atual IEC 61267 de 2005 (MAIA e CALDAS, 2005; IEC, 1994).

Pereira e Caldas estudaram e determinaram as distribuições espectrais envolvidas nas atividades de radiodiagnóstico com foco em proteção radiológica, por meio da avaliação de medidas experimentais das distribuições de energia dos feixes de raios-x de referência da IEC utilizados na prática clínica com a utilização de um semiconductor de CdZnTe (PEREIRA, 2004).

Potiens e Caldas mostraram, através de medidas dos espectros de feixes de raios-x de referência da IEC, que é possível calibrar de forma confiável medidores não invasivos de tensão, os “*kVp meters*”, através da determinação da energia máxima no espectro experimental (POTIENS e CALDAS, 2001-b). Potiens também mostrou metodologias para a calibração de instrumentos em feixes primários e espalhados utilizados em radiodiagnóstico através de radiações de referências de recomendações internacionais (POTIENS, 1999).

A norma 61267/2005 da IEC é aplicada a procedimentos de teste que, para a determinação das características de equipamentos de radiodiagnóstico médicos, necessitam de parâmetros bem definidos de feixes de radiação. Esta norma expressa os parâmetros em termos da tensão do tubo de raios-x, a primeira e segunda camada semi-redutoras e o coeficiente de homogeneidade.

### **2.6.2. Tensão de Pico Prático**

Diferentemente da grandeza tensão de pico, que é a máxima tensão atingida por um equipamento de raios-x durante uma exposição, a tensão de pico prático é definida como a média ponderada de todos os valores de tensão que ocorrem durante uma exposição. A ponderação é realizada de tal modo que valores idênticos de tensões de pico prático fornecem valores iguais de baixo contraste radiográfico, independente da forma de onda do gerador de alta tensão do equipamento de raios-x (IEC, 2005).

Embora a tensão de pico prático seja uma grandeza mensurável de forma não invasiva ou indireta, o nível de incerteza exigido por norma demanda o uso de técnicas invasivas. Angulações do anodo, diferenças de filtração inerente e outros fatores podem influenciar em medidas indiretas, ao contrário das medidas invasivas (IEC, 2005).

### **2.6.3. Camada Semi-Redutora e Coeficiente de Homogeneidade**

A primeira camada semi-redutora (1ª CSR) é definida como a espessura de um material específico que atenua a intensidade do feixe de radiação à metade do seu valor inicial medido sem qualquer absorvedor (LACERDA, 2002). A contribuição de toda radiação espalhada, ou outra fonte que podem estar presentes no feixe devem ser consideradas de modo a corrigir sua influência; portanto é importante que o volume sensível da câmara de ionização utilizada seja o menor possível, de modo a minimizar os efeitos indesejáveis da radiação espalhada (IAEA, 2007), também é importante que a câmara apresente boa estabilidade nas medidas e baixa dependência energética, devido à presença de um espectro heterogêneo em energias em feixes de raios-x.

A segunda camada semi-redutora é definida como a espessura de um material específico que atenua a intensidade do feixe de radiação a um quarto do seu inicial subtraída do valor da 1ª CSR deste mesmo material (IAEA, 2007); na área de radiodiagnóstico é muito comum expressar a CSR em termos de milímetros de alumínio.

A razão entre a 1ª CSR e a 2ª CSR é denominada coeficiente de homogeneidade (CH). Este coeficiente expressa a característica de composição de energias do feixe em espectrometria, pois quanto mais seu valor se aproxima de 1 (um), significa que mais homogêneo em termos de energia apresenta-se este feixe (GOETSCH et al.; 1984).

Portanto, caracterizar uma distribuição espectral por meio da tensão do equipamento de raios-x, a 1ª CSR e a 2ª CSR é uma exigência, a fim de evitar qualquer ambigüidade entre feixes distintos de radiação, pois dois tubos com a mesma tensão e 1ª CSR podem apresentar distribuições de espectros de energia completamente diferentes, devido a diferenças existentes no desgaste entre eles em termos da angulação efetiva do anodo, filtração inerente, etc. (IEC, 2005).

#### **2.6.4. Radiações de Referência**

As radiações de referência da IEC são caracterizadas por um código de letras e números que definem, dentre outros, de que elemento químico é formado o material utilizado para a filtração do feixe primário de radiação, a tensão de utilização do tubo de raios-x e o objetivo da caracterização do feixe em termos do equipamento que se deseja calibrar. Algumas das radiações de referência são chamadas de qualidades primárias e, com boa aproximação, são livres de radiação espalhada (RQR, RQA, RQC, RQT, RQR-M e RQA-M). Para simulações de pacientes existem as radiações de referência com a influência da radiação espalhada (RQN, RQB, RQN-M e RQB-M).

As radiações de referência definidas como RQR representam o feixe de radiação após sofrer atenuação pela adição de filtros de alumínio a espessuras calculadas.

O número da RQR é relacionado com a tensão de pico prático do tubo de raios-x de acordo com a Tabela 1 e deve ser calculado com incertezas máximas de 1,5 % ou 1,5 kV para um fator de abrangência  $k$  igual a 2 (o que for maior).

Implantar uma radiação de referência significa reproduzir os parâmetros obtidos nos laboratórios primários respeitando-se os limites de tolerância.

Para cada radiação de referência existem alguns requisitos que devem ser aplicados para que esta seja considerada implantada (Tabela 1) Os limites de tolerância para a 1ª CSR são de  $\pm 3\%$  e para os coeficientes de homogeneidade são de  $\pm 0,03$  (adimensional). O material do anodo deve ser o tungstênio ou uma liga rica em tungstênio com até 10 % de rênio e sua angulação não deve ser menor que  $9^\circ$ .

**Tabela 1. Requisitos para implantação das radiações de referência RQR (IEC, 2005).**

<b>Radiação de Referência</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>1ª CSR (mAs)</b>	<b>Coefficiente de Homogeneidade</b>
RQR 2	40	1,42	0,81
RQR 3	50	1,78	0,76
RQR 4	60	2,19	0,74
RQR 5	70	2,58	0,71
RQR 6	80	3,01	0,69
RQR 7	90	3,48	0,68
RQR 8	100	3,97	0,68
RQR 9	125	5,00	0,68
RQR 10	150	6,57	0,72

As radiações de referência definidas como RQA dependem da implantação das RQR's e representam a atenuação da radiação por um objeto que simula um paciente.

As radiações de referência definidas como RQC dependem da implantação das RQR3, RQR5 e RQR8 e representam o feixe de radiação após sofrer modificações pela adição de filtros de alumínio e cobre para o ajuste do sistema automático de exposição em fluoroscopia.

As radiações de referência definidas como RQT dependem da implantação das RQR8, RQR9 e RQR10 e representam o feixe de radiação após sofrer modificações pela adição de filtros de alumínio e cobre para simulação de campos de tomografia computadorizada.

Existem as radiações que são utilizadas para simulação de feixes mamográficos. Devem possuir feixes de radiação gerados com tensão essencialmente abaixo dos 40 kV, anodo de molibdênio e pouca atenuação para as denominadas RQR-M e atenuação suficiente para simular um paciente em se tratando das RQA-M.

As radiações de referência RQN, RQB simulam campos de radiação com a presença de fantasmas para feixes estreitos e largos respectivamente com a presença mais significativa da radiação secundária. Este conceito vale para os feixes RQN-M e RQB-M, porém estes últimos são aplicados na área de mamografia.

## 2.7. Cálculo das Incertezas

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física, é de fundamental importância que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal 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 em uma especificação ou norma. É, portanto, necessário que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza (ABNT, INMETRO, SBM, 1998).

Estas incertezas têm as mais variadas origens e estão relacionadas principalmente aos equipamentos utilizados (incertezas inerentes à calibração, resolução, etc.) e técnicas aplicadas às medições.

### 2.7.1. Formas de Distribuição de um Conjunto de Valores

A dispersão de um conjunto de valores pode tomar diferentes formas, ou distribuições de probabilidade. Em um conjunto de leituras, muitas vezes os valores tendem a se encontrar mais próximos da média. Esta é uma típica distribuição *normal* ou *Gaussiana*. Pode-se ver este tipo de distribuição quando se examina parâmetros de um equipamento de raios-x, tais como a taxa de kerma por este emitida. A maioria dos valores de taxa de kerma estará próxima da média; poucos são extremamente mais altos ou baixos.

Para se calcular a incerteza relativa a medidas que obedecem uma distribuição normal, deve-se dividir o valor do desvio padrão das leituras pela raiz quadrada da quantidade de medidas realizadas.



Quando os valores das medições encontram-se distribuídos igualmente entre o maior e menor valor, gera-se uma distribuição retangular, ou seja uniforme (IAEA, 2000); outra forma de distribuição da probabilidade dos valores de leitura é a triangular. Neste tipo de distribuição, supõe-se que um valor de leitura admite valores que se encontram em uma faixa mais limitada em relação a uma distribuição retangular.

### ***2.7.2. Tipos de Incerteza e Métodos de Cálculo***

Para a realização do cálculo da incerteza inerente a um processo de medição, primeiramente é preciso identificar as fontes de incerteza. A partir deste ponto precisa-se estimar a contribuição de cada fonte no valor de incerteza. Finalmente, as incertezas individuais são combinadas para gerar a incerteza padrão combinada.

Existem regras para determinar a contribuição de cada incerteza e para combiná-las, além disso, é preciso determinar o tipo de incerteza associada ao processo de medição.

#### ***2.7.2.1. Incertezas do Tipo A***

Incertezas do tipo A são estimadas pela utilização de métodos estatísticos, através de cálculos de média das medições e seu desvio padrão; em uma série de  $n$  medidas, onde são obtidos valores  $x_i$ , a melhor estimativa da quantidade de  $x$  é dada pela média aritmética das mesmas, que são obtidas da seguinte forma:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

A dispersão dos valores medidos em torno de sua média aritmética pode ser caracterizado pelo desvio padrão, que é calculado através da seguinte equação:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

onde:  $s(x_i)$  representa o desvio padrão.

As incertezas do tipo A foram calculadas com a utilização da equação 5:

$$U_A = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

onde:  $U_A$  é o valor da incerteza do tipo A.

$s(x_i)$  é o valor do desvio padrão das medidas.

$n$  é a quantidade de medidas realizadas.

#### 2.7.2.2. Incertezas do Tipo B

Incertezas do tipo B são estimadas usando qualquer outra informação. Pode ser informação de medições em experiências passadas, de certificados de calibração, especificações de fabricantes, de cálculos, de informações publicadas, além da experiência do realizador das medidas para estimá-las da forma mais coerente possível.

Para a realização do cálculo das incertezas do tipo B estimadas pelo realizador das medidas, deve ser levada em consideração a influência deste dado no menor valor medido experimentalmente, sendo que o resultado é dividido pela raiz quadrada de 3 para uma distribuição retangular, de acordo com a equação 6:

$$U_B = \frac{U_{\text{máx}}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

onde:  $U_B$  é o valor da incerteza do tipo B.

$U_{\text{máx}}$  é o valor da maior influência da incerteza estimada nas medidas.

É importante observar que uma avaliação da incerteza tipo B pode ser tão confiável quanto uma avaliação do tipo A, especialmente em uma situação de medição onde uma avaliação do tipo A é baseada em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes (ABNT, INMETRO, SBM, 1998).

### 2.7.2.3. Combinação das Incertezas

Após determinadas as fontes de incertezas relevantes ao processo de medição, deve-se combiná-las, de modo a encontrar um valor representativo para o seu resultado final.

Quando a incerteza é expressa no certificado de calibração de um equipamento, ela é uma componente da incerteza do tipo B, e é calculada através de sua divisão pelo fator de abrangência ( $k$ ), informado no próprio certificado, obtendo-se a incerteza combinada ( $U_B$ ) de acordo com a equação 7:

$$U_B = \frac{U}{k} \quad (7)$$

onde  $U$  é o valor da incerteza expandida informada no certificado de calibração do instrumento em questão.

Para realização dos cálculos, de modo a se obter o valor da incerteza combinada ( $U_C$ ) calculada na realização das medidas, utiliza-se a equação 8:

$$U_C = \sqrt{\sum U_A^2 + \sum U_B^2} \quad (8)$$

#### 2.7.2.4. Fator de abrangência $k$

A partir da determinação das componentes da incerteza de forma consistente, a incerteza combinada padrão pode ser pensada como equivalente a “um desvio padrão” de nível de confiança.

Em certos casos, uma incerteza global, pode ser estabelecida em um nível de confiança diferente. De acordo com a finalidade das medidas, precisa-se de maior nível de confiança; este novo cálculo pode ser feito usando o fator de abrangência,  $k$ .

O fator de abrangência é determinado à partir da distribuição  $t$  de Student com graus efetivos de liberdade  $\nu_{eff}$ , para um nível de confiança  $p$ . O valor do grau efetivo de liberdade,  $\nu_{eff}$ , a ser utilizado para determinar  $k$  é calculado por meio da aproximação dada pela equação 9, fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$\nu_{eff} = \frac{U_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{U^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (9)$$

onde:  $\nu_i$  representa o valor dos graus de liberdade efetivos associados a  $U(x_i)$ ;

No caso de incertezas do tipo A,  $\nu_i$  será determinado com base nos dados e no processo de medição. Para  $n$  observações independentes de uma grandeza de entrada  $X_i$ , determinada por medição direta pela média aritmética das observações, tem-se que o grau de liberdade é dado pela equação 10:

$$\nu_i = n - 1 \quad (10)$$

No caso de incertezas do tipo B, quando  $\nu_i$  não for declarado em certificados de calibração, não puder ser obtido da literatura ou determinado com base na experiência, será considerado preferencialmente que  $\nu_i = \infty$ .

Multiplicando a incerteza combinada ( $U_c$ ) pelo fator de abrangência obtém-se a incerteza expandida ( $U$ ), de acordo com a equação 11:

$$U = U_c \cdot k \quad (11)$$

### 3. MATERIAIS

#### 3.1. Equipamento de Raios-x

Os feixes de raios-x foram produzidos por meio de um equipamento industrial (Figura 6) Pantak Seifert, modelo ISOVOLT HS 320 de potencial constante (AGFA, 2003), no Laboratório de Calibração de Dosímetros - LCD do CDTN/CNEN. O equipamento opera na faixa de 5 a 320 kV de tensão, com corrente que varia de 0,1 a 45 mA, potência de dissipação de energia no anodo máxima de 2240 W e pode ser operado continuamente variando somente a potência de dissipação de energia de acordo com o foco que esteja sendo utilizado: o foco grosso com o tamanho de 3,6 mm e o fino de 1,9 mm. O aparelho é muito estável e opera em condições nas quais o desvio padrão da intensidade do feixe de raios-x não ultrapassa cerca de 0,3 % das medições.



Figura 6. (a) Tubo de raios-x Pantak Seifert – ISOVOLT HS 320. (b) Tubo de raios-x Pantak Seifert com blindagem.

#### 3.2. Câmaras de Ionização e Eletrômetros

Para a realização das medidas do kerma no ar foram utilizadas duas câmaras de ionização, ambas de 6 cm<sup>3</sup>, da Radcal Corporation, com paredes de policarbonato finamente grafitadas em seu interior.

A câmara de modelo 10X5-6 (Figura 7-a) possui número de série 15.266 e suas dimensões estão especificadas na Figura 8. Esta câmara foi conectada a um eletrômetro Radcal Corporation (Figura 7-b), modelo 9015, número de série 91-0288 (RADCAL, 1994), rastreável a dosímetros padrões por meio da calibração do conjunto, certificado número 0146/304 de 19/02/2004, emitido pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN (IPEN, 2004).

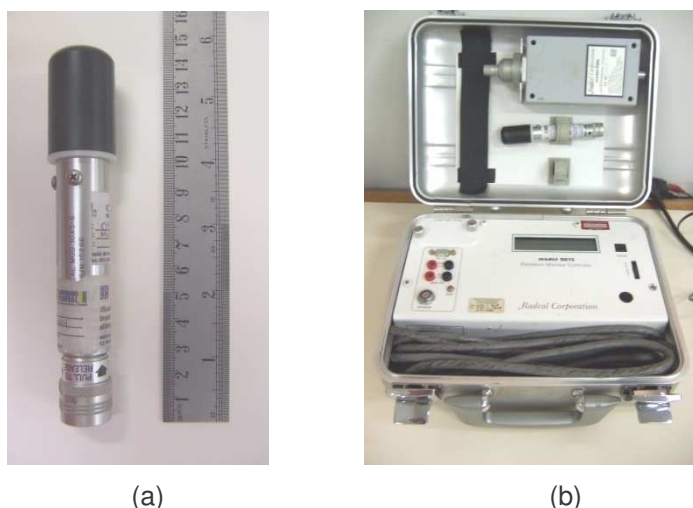


Figura 7. (a) Câmara de ionização Radcal modelo 10X5-6. (b) Eletrômetro Radcal modelo 9015.

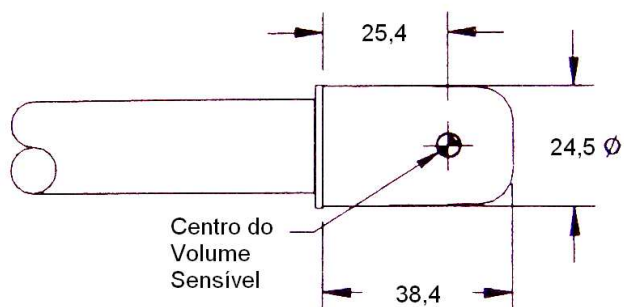


Figura 8. Dimensões em milímetros da câmara Radcal 10X5-6.

Este conjunto câmara-eletrômetro foi projetado para medições na faixa de  $1 \mu\text{Gy}/\text{min}$  a  $10 \text{Gy}/\text{min}$ , com uma resolução de  $0,01 \mu\text{Gy}$  e dependência energética de  $\pm 5\%$  de 20 a 1330 keV, de acordo com a Figura 11 (RADCAL, 1994).

A câmara de ionização modelo RC6 (Figura 9) possui número de série 16.951 e apresenta as dimensões especificadas na Figura 10. Esta câmara foi conectada a um eletrômetro da fabricante Keithley, modelo 6517-A, número de série 989.662

(RADCAL 2007; KEITHLEY 2007a, b, 2000) rastreável a dosímetros padrões por meio do certificado de calibração número LRD 0003/2006 emitido pelo LNMRI – IRD / CNEN em 21/11/2006 (IRD, 2006).

Esta câmara (Figura 9) é utilizada como padrão de referência para calibração de detectores e possui uma dependência à taxa de exposição menor que 5% na faixa de 0,15 a 4 Gy/s para pulsos de 10 ms, com uma resolução de 0,001  $\mu\text{C}$ , que representa 4,431  $\mu\text{Gy}$  e dependência energética de  $\pm 5\%$  de 20 a 1330 keV (RADCAL, 2007).



Figura 9. Câmara de ionização Radcal modelo RC-6.

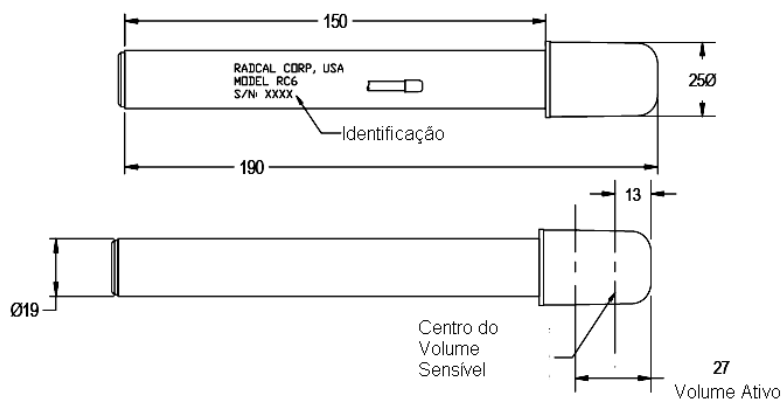
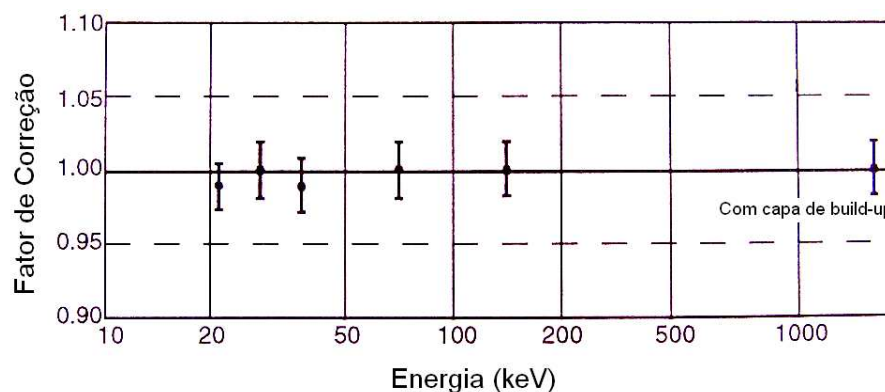


Figura 10. Dimensões em milímetros da câmara Radcal RC6.





**Figura 11. Dependência energética das câmaras de ionização 10X5-6 e RC6 (RADCAL, 1994, 2007).**

A Figura 12 mostra o eletrômetro Keithley utilizado para contagem de cargas elétricas geradas no interior da câmara de ionização por meio de interações das radiações.



**Figura 12. Eletrômetro Keithley modelo 6517-A.**

### 3.3. Câmara de Monitoração

Para a realização da correção de possíveis variações na intensidade do feixe de radiação emitido pelo equipamento de raios-x, na calibração da câmara 10X5-6 foi utilizada uma câmara de monitoração PTW Freiburg, TN34014 e número de série CE0124 (Figura 13); esta câmara é formada por três placas paralelas de policarbonato (Poliimido) grafitadas, com diâmetro sensível de 155 mm e espessura de 0,025 mm cada. É utilizada para medições na faixa de energia de 7,5 a 400 keV,

com taxas de dose abaixo de 25 Gy/s, operando a uma tensão entre seus eletrodos de 500 V (PTW, 1998). Esta câmara foi conectada a um eletrômetro Keithley, modelo 6517-A, número de série 972.953.



**Figura 13. Câmara de Monitoração PTW-Freiburg TN34014.**

### **3.4. Filtros de Alumínio**

Para a implantação das radiações de referência, bem como medições de camada semi-redutora para cálculos da filtração inerente do equipamento de raios-x e análises do tamanho do campo e sua uniformidade sob condições variadas de filtração foram utilizados filtros de alumínio de alta pureza da fabricante Goodfellow (Figura 14) com pureza de 99,999 %. Também foram utilizados filtros comerciais (Figura 15) com pureza de 99,425 % de alumínio, ferro a 0,295 %, silício a 0,199 %, potássio a 0,050 %, titânio a 0,011, zinco a 0,011, germânio a 0,004 %, gálio a 0,003 % e ouro a 0,002 %, segundo análise de espectrometria por fluorescência de raios-x realizada pelo CDTN (estes serão chamados de filtros de baixa pureza).



**Figura 14. Filtros de alta pureza Goodfellow (99,999 % de alumínio).**



**Figura 15. Filtros de baixa pureza (99,425 % de alumínio).**

### **3.5. Espectrômetro de CdTe**

Para a determinação dos espectros dos feixes de raios-x, bem como determinação de suas energias máximas foi utilizado um espectrômetro modelo EXV9 - XR-100T CdTe, número de série T1013 com analisador multicanal, número de série 003157, ambos da fabricante Amptek (Figura 16).



Figura 16. Espectrômetro XR-100T CdTe e analisador multicanal.

Trata-se de um sistema de espectrometria portátil de alta resolução, composto por um amplificador PX2T-CdTe, um analisador multicanal modelo MCA 8000A e um detector semicondutor de telureto de cádmio (CdTe), refrigerado por efeito termoelétrico através da utilização de células Peltier (Figura 17). O programa computacional denominado PMCA, versão 2.0.1 desenvolvido pela Amptek Inc. foi utilizado possibilitando a aquisição e a visualização das distribuições de altura de pulso.

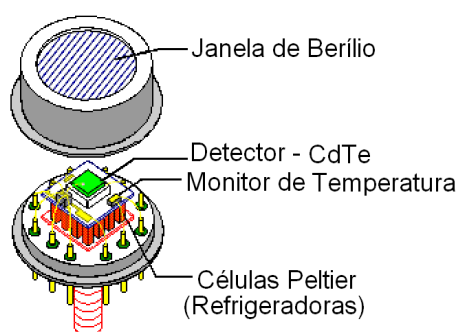


Figura 17. Diagrama esquemático da montagem do detector CdTe e seus componentes.

### 3.6. Fontes Radioativas

Foi utilizada uma fonte padrão PTW de  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$  emissora de radiação beta (Figura 18), para a verificação da estabilidade da resposta da câmara de ionização RC6. Esta fonte possui número de série 8921-1349 e atividade de 30 MBq na data de referência.



Figura 18. Fonte de  $^{90}\text{Sr}$  –  $^{90}\text{Y}$  emissora de radiação beta PTW1995.

Também foram utilizadas fontes emissoras de raios-x e gama da fabricante Isotop, para a calibração do espectrômetro de CdTe XR-100T em energias. Tratam-se de fontes de  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{241}\text{Am}$  e  $^{57}\text{Co}$  (Figura 19).

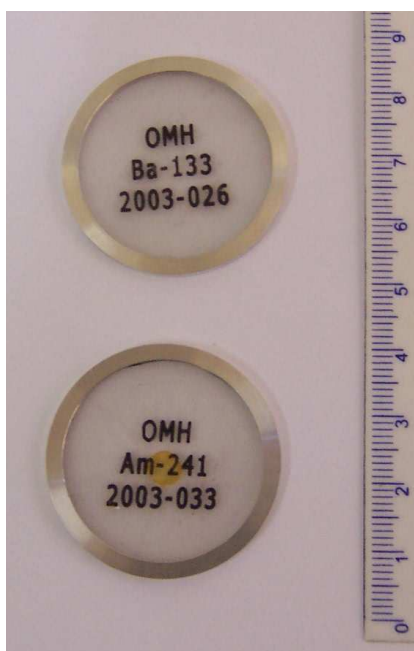


Figura 19. Fontes de  $^{133}\text{Ba}$  e  $^{241}\text{Am}$  da fabricante Isotop.

### 3.7. Demais Equipamentos

Para as medidas de pressão foi utilizado um transdutor de pressão Setra, número de série 431.461, conectado a um multímetro digital programável Tektronix DM 2510G (Figura 20), com certificado de calibração número LAPRE 0405/2000, emitido pelo Laboratório Nacional de Metrologia do INMETRO em 06/09/2000 (INMETRO, 2000). Para as medidas de temperatura foi utilizado um termômetro digital Minipa, modelo MT – 510, certificado de calibração TD510001591 emitido pelo Laboratório de Metrologia Mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT em 03/01/2006 (IPT, 2006). Para as medidas de tempo (quando necessário), usou-se um cronômetro Technos, modelo TEC426, número de série 30271, calibrado pela LABELO-PUCRS (PUCRS, 2007), certificado número F04808 emitido em 05/10/2007.



Figura 20. Transdutor de pressão Setra conectado ao multímetro digital Tektronix.

## 4. MÉTODOS

### 4.1. Determinação da Filtração Inerente

A filtração inerente de um tubo de raios-x é um fator muito importante quando se deseja utilizar este equipamento para calibração, pois o feixe primário de raios-x apresenta mudanças no espectro de energias após interagir nos componentes do próprio tubo, como o vidro e o óleo de refrigeração.

Para a determinação da filtração inerente, seria ideal que o feixe primário de raios-x não apresentasse fótons de radiação secundária ou espalhada, o que não é uma condição possível de se conseguir. Porém, pode-se reduzir consideravelmente esta influência através de uma boa geometria de posicionamento do suporte dos atenuadores da radiação, além da adição de um colimador após os atenuadores (Figura 21).

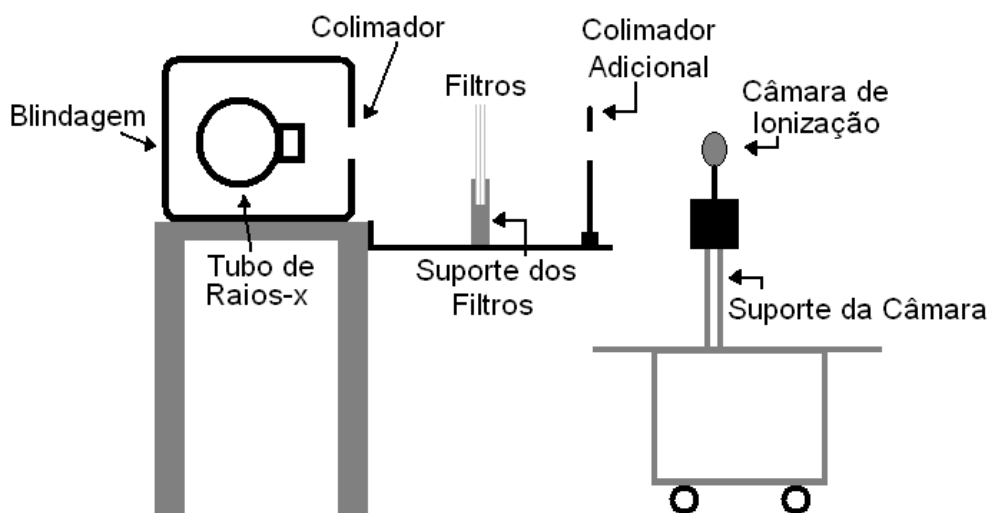


Figura 21. Esquema de posicionamento do suporte dos atenuadores e do colimador adicional.

Foi realizado um estudo para a verificação da influência da radiação espalhada pelo suporte dos atenuadores de alumínio, com a utilização do conjunto câmara 10X5-6 e eletrômetro 9015 para realização das leituras.

Este teste foi realizado através do registro de 10 leituras de kerma no ar feitas com a utilização do suporte sem a colocação de filtros e logo depois foram realizadas novas 10 leituras sem a utilização do suporte dos atenuadores (Figura 22). A tensão do tubo de raios-x foi ajustada em 60 kV e a corrente em 5 mA.

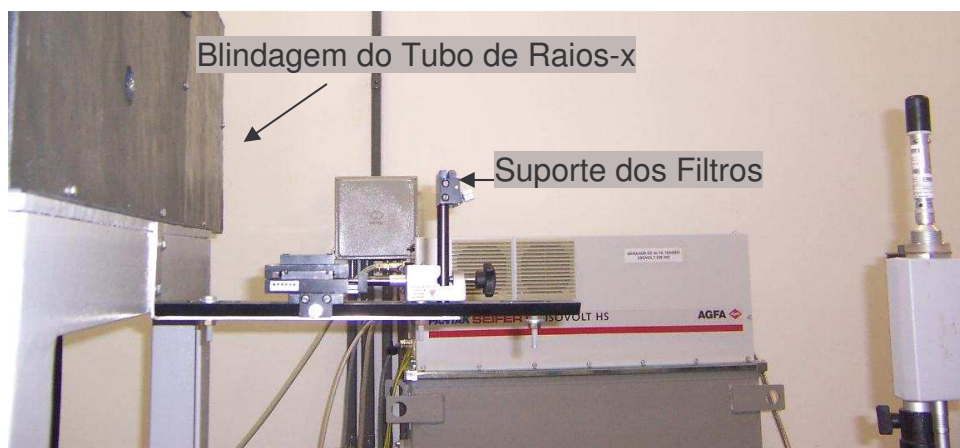


Figura 22. Perfil do sistema de posicionamento com o suporte dos filtros.

As leituras em ambos os casos foram feitas acionando-se o eletrômetro modelo 9015 juntamente com o cronômetro e os valores de kerma no ar eram registrados em aproximadamente 60 segundos. O valor da influência causada pelo suporte dos atenuadores foi calculado com a utilização da equação 12:

$$I_r = \frac{L_{CS} - L_{SS}}{L_{SS}} \times 100 \quad (12)$$

Onde:  $L_{CS}$  representa o valor da média das leituras utilizando o suporte dos filtros;

$L_{SS}$  representa o valor da média das leituras sem a utilização do suporte dos filtros.

Depois de verificada a viabilidade da utilização deste suporte para os atenuadores realizou-se a medida da filtração inerente. Esta é uma medição indireta, que se trata de uma comparação do valor de camada semi-redutora (CSR) do feixe de raios-x a uma tensão de 60 kV comparada com os valores estabelecidos por norma (ISO 1996-b).



Para a determinação da CSR gerou-se uma curva de atenuação do feixe de raios-x, conseguida com a adição de atenuadores de alumínio de espessuras bem definidas colocados em um suporte (Figura 22).

Na realização deste tipo de medição, foi importante escolheu-se uma câmara de ionização cujo volume sensível foi de  $6 \text{ cm}^3$ , de modo a reduzir os efeitos indesejáveis das radiações espalhadas. Outro aspecto importante na escolha foi a dependência energética da câmara de ionização na faixa de energia utilizada, que foi de  $\pm 5 \%$  (Radcal, 2007).

Posicionou-se o centro geométrico da câmara de ionização no centro do campo de radiação a um metro do ponto focal do equipamento de raios-x e perpendicular a este. O eletrômetro foi acionado juntamente com o cronômetro e 10 valores de kerma no ar foram registrados em aproximadamente 60 segundos cada. Este procedimento também foi realizado com o eletrômetro operando na função de medição de taxa de kerma para fins de comparação dos resultados e com os dados adquiridos calculou-se a CSR para os dois modos de medição de kerma no ar.

#### **4.2. Verificação da Estabilidade da Resposta da Câmara de Ionização RC6**

A aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo é chamada de estabilidade do instrumento (INMETRO, 2000).

Para que se obtenha um bom padrão de confiança em medições realizadas com câmaras de ionização é importante que se tenha um estudo comprovando a estabilidade da resposta destas em função de um mesmo estímulo, que pode ser uma fonte de radiação padrão em ensaios realizados sempre sob as mesmas características de irradiação.

A verificação da estabilidade foi realizada analisando-se a repetitividade da resposta da câmara, que é definida como o grau de concordância dos resultados de medições

sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição (INMETRO, 2000).

Também foi analisada a reprodutibilidade da resposta da câmara, que é definida como o grau de concordância dos resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição (INMETRO, 2000).

Este estudo foi realizado com a câmara de ionização modelo RC-6 da Radcal Corporation conectada ao eletrômetro Keithley, através da utilização de uma peça de acrílico no qual foram posicionadas, sempre com a mesma geometria a câmara de ionização e uma fonte padrão PTW de  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$  número 8921-1349, emissora de radiação beta.

O sistema câmara-eletrômetro foi mantido ligado ininterruptamente em condições adequadas de temperatura e umidade, de modo que não perdesse a estabilidade eletrônica necessária para a realização das medições.

Foram realizadas dez leituras da carga elétrica gerada pela fonte de radiação em intervalos de tempo de 120 segundos e calculou-se a corrente elétrica  $i$  gerada, corrigida pelo decaimento radioativo da fonte, através da seguinte equação:

$$i = \left( \frac{q}{t} \cdot f_{T,P} \right) \cdot \frac{A_0}{A} \quad (13)$$

onde:  $q$  é o valor da carga elétrica gerada pela fonte de radiação;

$t$  é o tempo em que a câmara ficou exposta à fonte de radiação;

$f_{T,P}$  é o fator de correção para a densidade do ar;

$A_0$  é o valor da atividade de referência da fonte padrão utilizada;

$A$  é o valor da atividade na data da realização da medição calculada através da seguinte equação:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t_d} \quad (14)$$

onde:  $\lambda$  é o valor da constante de desintegração do  $^{90}\text{Sr}$ ;  
 $t_d$  é o tempo decorrido entre a data de referência até a data da medição.

O fator  $f_{T,P}$  leva em consideração a temperatura e a pressão do ambiente de medição para cada leitura e é calculado da seguinte forma:

$$f_{T,P} = \left( \frac{T + 273,15}{293,15} \right) \cdot \left( \frac{101,325}{P} \right) \quad (15)$$

onde: T é a temperatura, em °C, no momento da medição;  
P é a pressão atmosférica, em kPa, no momento da medição.

Logo após a realização da medição da corrente elétrica gerada pela fonte padrão, mediu-se a corrente de fuga do conjunto câmara-eletrômetro.

Irradiou-se a câmara de ionização por cerca de 20 minutos e retirou-se a fonte do sistema. Após 900 segundos sem qualquer fonte de radiação o valor de carga gerada foi registrado. O valor da corrente de fuga  $i_f$  foi calculado através da seguinte equação:

$$i_f = \frac{q - q_0}{t} \quad (16)$$

onde:  $q$  é o valor da carga elétrica gerada pela fonte de radiação;  
 $q_0$  é o valor da carga elétrica sem qualquer fonte de radiação após um determinado tempo  $t$ ;  
 $t$  é o tempo em que o sistema ficou sem a presença da fonte de radiação.

Este teste foi realizado diariamente no primeiro mês, para então ser realizado semanalmente e, depois de obtidas 50 medições de correntes elétricas geradas pela fonte padrão, calculou-se a média das leituras. Este valor foi chamado de corrente de referência da câmara de ionização  $i_R$  e serve como uma linha de base para análise da confiabilidade da resposta da câmara com o passar do tempo e condições de uso do sistema.

### 4.3. Verificação da Uniformidade e do Tamanho do Campo de Radiação

Foram realizados os estudos do tamanho e da uniformidade do campo de raios-x sob duas condições: na primeira, a filtração total do equipamento foi de 0,17 mm Al, já na segunda condição adicionou-se 2,81 mm Al, perfazendo uma filtração total de 2,98 mm Al, que para o equipamento em questão reproduz as condições de implantação da radiação de referência RQR6 de tensão 80 kV da IEC (IEC, 2005). A escolha da RQR6 foi realizada devido ao fato desta se encontrar em um ponto intermediário na faixa de tensão das radiações de referência RQR.

Para realizar tais estudos, foi posicionada a câmara de ionização (Figura 23) a um metro do ponto focal do equipamento de raios-x exatamente no centro do campo de radiação (Figura 24). Este ponto foi chamado de (0,0) e foi criada uma matriz nos eixos horizontal (x) e vertical (y) de 30 por 28 centímetros, respectivamente (área suficiente para varredura de todo o campo de radiação a um metro).

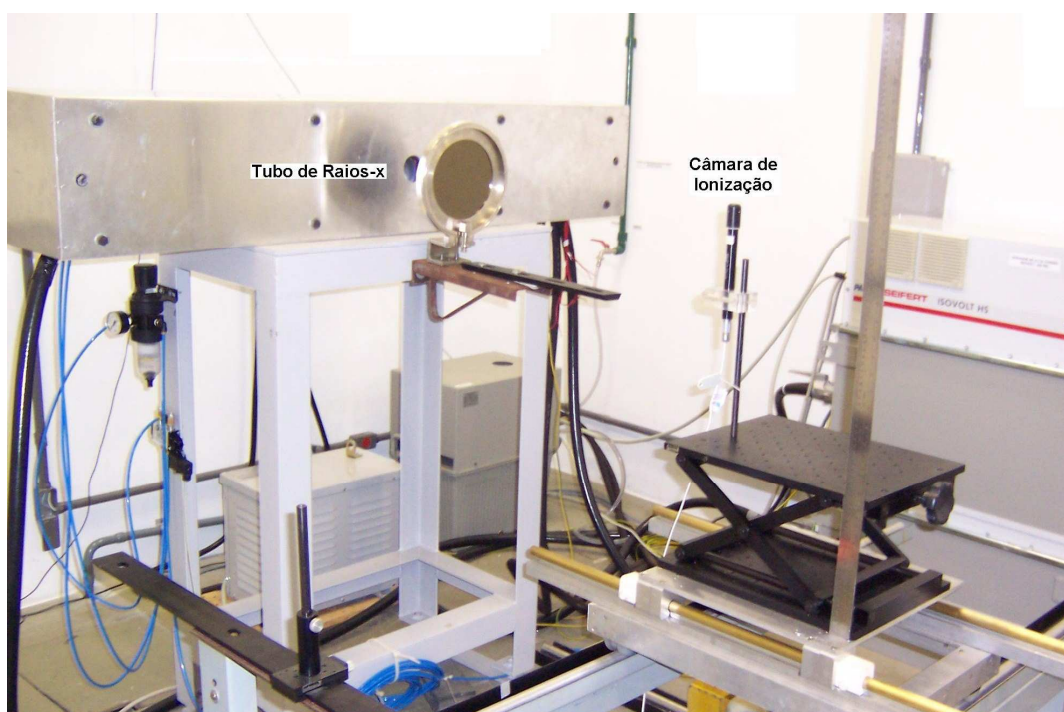
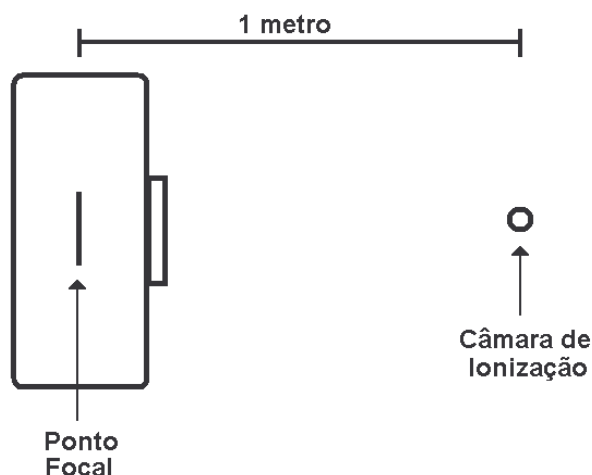
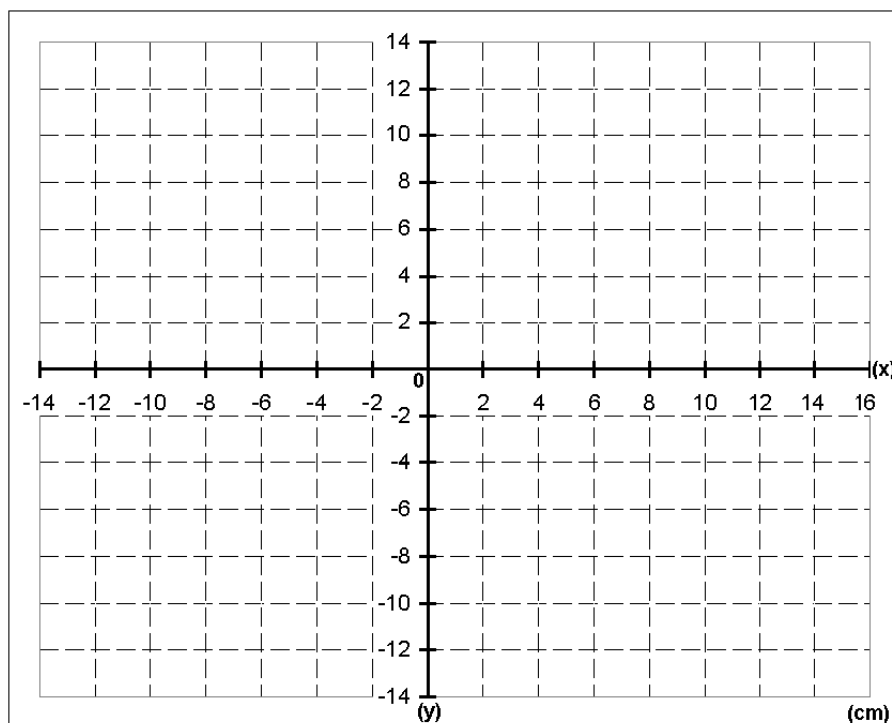


Figura 23. Sistema de posicionamento da câmara de ionização para o estudo do campo de raios-x.



**Figura 24. Esquema do posicionamento centralizado da câmara de ionização para o estudo do campo de radiação.**

Em cada conjunto das coordenadas cartesianas pares (ex.: 0,2; -2,-2; etc.) foi posicionada a câmara de ionização (Figura 25) e realizou-se 10 medidas na condição de baixa filtração e 5 medidas na segunda condição (RQR6), tanto para o foco grosso, quanto para o foco fino.



**Figura 25. Exemplo da matriz utilizada para o posicionamento da câmara de ionização.**

A mudança na quantidade de medições para a condição de filtração total maior (2,98 mm Al) se deveu apenas ao fato da taxa de kerma no ar do equipamento ter

demonstrado grande repetitividade no ato da realização das medidas na primeira condição (0,17 mm Al), portanto diminuiu-se o tempo de aquisição de dados para fins práticos (OLIVEIRA et. al. 2007-c).

Os valores de intensidade relativa de kerma no ar para cada ponto de medição foram calculados através da seguinte equação:

$$V(\%) = \frac{L_{(x,y)}}{L_{(Máx)}} \times 100 \quad (17)$$

onde:  $V(\%)$  é o valor percentual da medida em relação ao ponto de maior valor de kerma no ar;

$L_{(x,y)}$  é o valor da medição em um determinado ponto da matriz (x,y);

$L_{(Máx)}$  é a leitura do ponto de maior valor de medição.

#### 4.4. Implantação das Radiações de Referência da IEC

Para se implantar uma radiação de referência “RQR” da IEC, deve-se fazer uma curva de atenuação para determinação da quantidade de filtração a ser adicionada no tubo de raios-x, de modo a se obter a 1ª CSR e o coeficiente de homogeneidade (CH) requeridos (OLIVEIRA et. al., 2007-a,c).

A curva de atenuação, bem como a medida da filtração a ser adicionada para se obter as radiações de referência, foi realizada selecionando-se a tensão específica a cada RQR, uma corrente de 5 a 15 mA dependendo da tensão utilizada e tempo de exposição de 40 segundos.

Posicionou-se o centro geométrico do volume sensível da câmara de ionização a uma distância de 1,0 m do ponto focal do equipamento de raios-x e perpendicular ao eixo central do feixe. O feixe de radiação foi colimado para se obter um campo de forma a cobrir todo o volume sensível da câmara de ionização, não ultrapassando a área determinada pela norma (IEC, 2005).

As radiações de referência da IEC foram implantadas sob duas condições, na primeira foram utilizados filtros comerciais com pureza de 99,425 %, segundo análise de espectrometria por fluorescência de raios-x EC4I0125/2007 realizada pelo CDTN, (estes serão chamados de filtros de baixa pureza por convenção) e na segunda foram utilizados filtros de alta pureza de 99,999 %, segundo análise do fabricante Goodfellow Cambridge Limited.

Os filtros foram posicionados exatamente no ponto médio entre a câmara de ionização e o ponto focal do equipamento de raios-x, um colimador adicional foi posicionado logo após os filtros de modo a reduzir a influência da radiação espalhada por estes (Figura 26), além de reduzir o tamanho do campo de radiação.

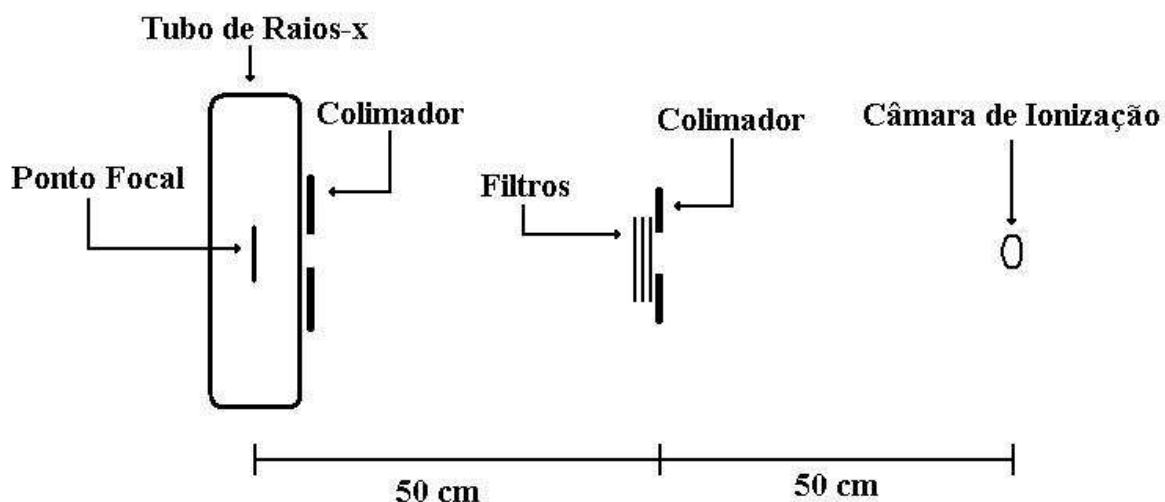


Figura 26. Esquema de posicionamento utilizado para a implantação das RQR's.

Foram realizadas medidas da taxa de kerma no ar para cada situação, iniciando-se sem qualquer filtro adicional e, em seguida, adicionaram-se filtros de alumínio de espessuras bem definidas.

Nas medições realizadas com filtros de baixa pureza foram realizadas 10 leituras, mas nas com filtros de alta pureza foram realizadas 6 leituras, pois verificou-se a grande estabilidade do equipamento de raios-x comprovadas pelos baixos valores de desvio padrão das medidas.

Com os dados obtidos foi feito um gráfico em escala semi-logaritmica da atenuação do feixe à medida que os filtros foram adicionados. Os pontos experimentais foram unidos através de linhas suavizadas e os valores do eixo que indica a intensidade dos raios-x (ordenadas) foram normalizados para a condição sem filtro adicional; em seguida foi criado um retângulo, para ser "deslizado" no gráfico da seguinte forma:

(A) A altura do retângulo foi determinada escolhendo-se um ponto experimental da curva de atenuação e a quarta parte do valor deste ponto no eixo "intensidade" (ordenadas); em seguida, traçou-se uma reta ligando estes dois pontos, paralelamente ao eixo das ordenadas. Desta forma foi determinada a altura do retângulo.

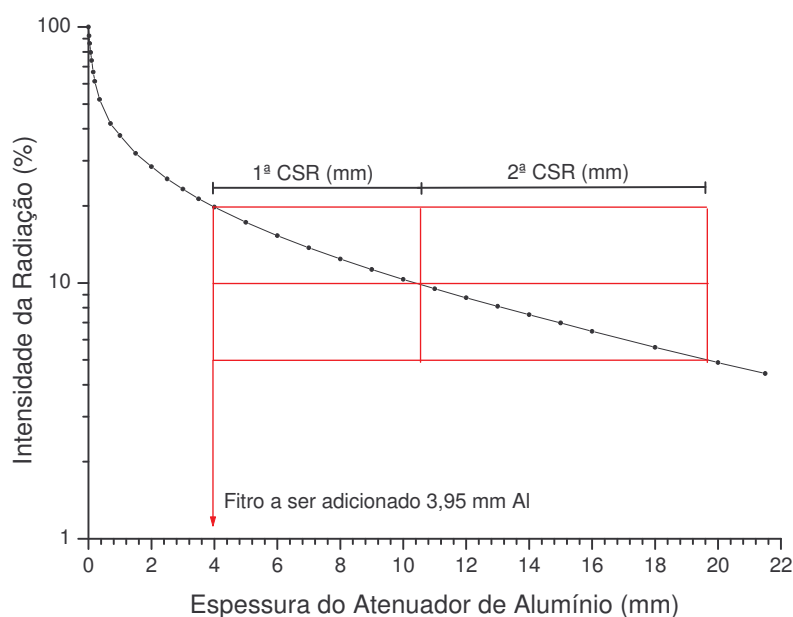


(B) O comprimento do retângulo foi determinado pela soma da 1ª CSR e 2ª CSR na mesma unidade do eixo que indica a espessura dos filtros utilizados para a atenuação da radiação (abscissas), estes valores de CSR são determinados por norma (IEC, 2005); Esta linha foi traçada paralelamente ao eixo das abscissas.

(C) Com o retângulo definido, traçou-se uma reta que passa exatamente no ponto médio relativo à altura deste e paralelo ao eixo das abscissas, em seguida traçou-se outra reta no retângulo paralela ao eixo das ordenadas, exatamente entre a 1ª e 2ª CSR.

(D) O retângulo criado foi deslizado sobre a curva de atenuação, de modo que o ponto superior esquerdo, o ponto de interseção das retas criadas dentro do retângulo e o ponto inferior direito deste, se apresentassem na curva de atenuação, ou o mais próximo possível da curva.

(E) A reta esquerda do retângulo, paralela ao eixo “intensidade”, foi prolongada até o eixo das espessuras e o valor encontrado é teoricamente o valor da filtração a ser adicionada no equipamento de raios-x para a obtenção da radiação RQR (Figura 27).



**Figura 27. Exemplo de determinação da filtração a ser adicionada ao tubo de raios-x para obtenção da RQR.**

(F) Após a filtração determinada em  $\underline{E}$  ser adicionada ao equipamento de raios-x, foi preciso determinar outra curva de atenuação, para o cálculo da 1ª e 2ª CSR (Equação 19) e os resultados foram verificados em relação aos limites de tolerância aplicados por norma (IEC, 2005).

$$CSR = \frac{x_b \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{L_a}{L_0}\right) - x_a \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{L_b}{L_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_a}{L_b}\right)} \quad (18)$$

onde:  $L_0$  é a média das leituras iniciais de medição de kerma no ar;

$L_a$  é a média das leituras de kerma no ar imediatamente superior a  $L_0/2$ ;

$L_b$  é a média das leituras de kerma no ar imediatamente inferior a  $L_0/2$ ;

$x_a$  é a espessura de alumínio correspondente à leitura  $L_a$ ;

$x_b$  é a espessura de alumínio correspondente à leitura  $L_b$ .

É importante salientar, que o retângulo criado se adequa bem em várias posições, mas nem todas permitem encontrar filtrações a serem adicionadas que possibilitem os parâmetros de CSR e CH dentro dos limites exigidos ( $\pm 3,0\%$  para a 1ª CSR e  $\pm 0,03$  para o CH). Este fato torna o trabalho de implantação das radiações de referência da IEC, um trabalho bastante complexo, que necessita tempo e paciência.

As incertezas combinada e expandida foram calculadas para as medidas de 1ª CSR e CH de acordo com ABNT, INMETRO, SBM, 1998.

## 4.5. Espectrometria das Radiações de Referência

### 4.5.1. Calibração do Sistema de Espectrometria

Calibrar o sistema de espectrometria significa associar valores conhecidos de energias de fótons com os canais disponíveis no dispositivo analisador de altura de pulso, dentro da faixa de energia que se deseja medir.

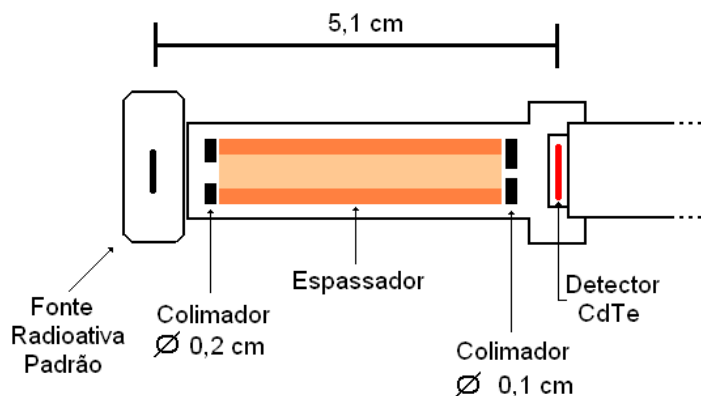
A calibração foi realizada através da medição dos espectros de energia de fontes radioativas padrão, emissoras de raios gama e raios-x dentro da faixa desejada conforme a Tabela 2, que mostra as fontes utilizadas e suas respectivas energias de emissão além da natureza da emissão de radiação.

**Tabela 2. Relação das fontes radioativas utilizadas, energias de emissão e natureza da radiação (PEREIRA, 2004).**

Isótopo	Natureza da Emissão (Raio-x/Gama)	Energia (keV)	Intensidade de Emissão (%)
amerício-241	Raio-x	13,9	13,3
	Raio-x	17,8	19,4
	Raio-x	20,8	4,9
bário-133	Gama	59,5412	35,9
	Raio-x	30,85	99,46
cobalto-57	Gama	80,89	36,68
	Gama	14,4130	9,16
	Gama	122,0614	85,6

Nas distribuições de energia, alguns dos picos de raios-x e raios gama de energias mais baixas podem não ser visualizados ou não são resolvidos. Eles existem sobrepostos nestas distribuições. A Tabela 2 mostra, para algumas energias, picos com intensidades e energias ponderadas (PEREIRA, 2004).

Para a realização da calibração foram posicionadas fontes de radiação a uma distância de 5,1 cm do detector CdTe, devido à pequena atividade das fontes utilizadas ( $\text{Am}^{241}$ ,  $\text{Ba}^{133}$ ,  $\text{Co}^{57}$ ). Foram posicionados dois colimadores de tungstênio no espectrômetro, com 0,2 cm e 0,1 cm de diâmetro separados por um espessador (Figura 28).



**Figura 28. Esquema de posicionamento das fontes para calibração do espectrômetro.**

Foi realizada contagem durante o tempo necessário para que os canais correspondentes às principais energias de emissão das fontes pudessem ser claramente indentificados.

Os canais foram determinados gerando-se uma interpolação de distribuição gaussiana do número total de eventos do canal por picos de intensidade de contagem.

#### **4.5.2. Detecção dos Espectros de Energia**

A detecção dos espectros de energia dos feixes de radiação de referência foi realizada posicionando-se o centro do volume sensível do detector de telureto de cádmio a 4,2 metros de distância do ponto focal do equipamento de raios-x, conforme mostra o esquema da Figura 29.

O espectrômetro foi posicionado sobre um suporte de acrílico, que possui um número atômico efetivo baixo, de modo a tornar a influência da radiação espalhada a mínima possível no espectro. Os espectros foram registrados e mostrados graficamente.

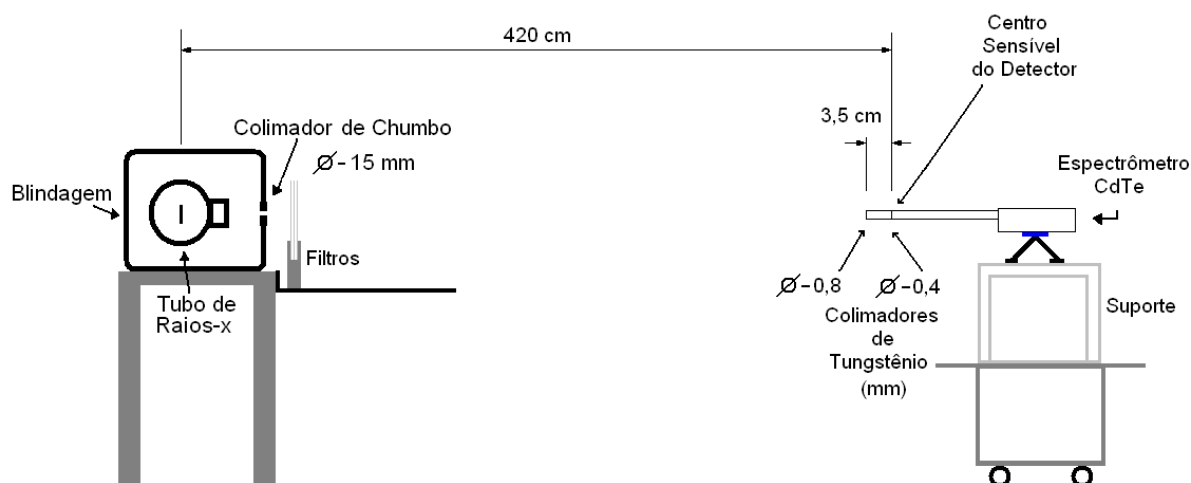


Figura 29. Esquema de posicionamento do espectrômetro.

Selecionou-se a tensão referente à radiação de referência e sua filtração, que foi adicionada no tubo de raios-x. A corrente foi selecionada em 0,1 mA e o tempo de exposição para cada aquisição de espectro foi de 200 segundos; também foram colocados dois colimadores adicionais de tungstênio no próprio espectrômetro, o primeiro com diâmetro de 0,8 mm e o segundo com 0,4 mm, separados por um espessador de 3,5 cm, de modo a evitar alta taxa de contagens de fótons no cristal de CdTe, o que poderia danificá-lo (Figura 30).

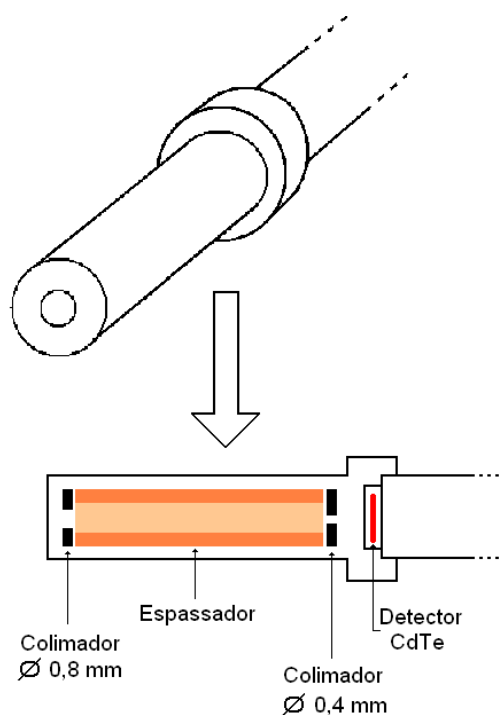


Figura 30. Esquema dos colimadores do espectrômetro.

#### 4.5.3. Verificação da Tensão de Pico (kVp)

Com a realização da espectrometria das radiações de referência foi possível determinar de forma indireta a tensão de pico do equipamento de raios-x, através da determinação da energia máxima no espectro medido.

Para determinação dos valores de tensão de pico foram somadas as contagens dos fótons de todos os espectros de uma determinada radiação de referência por canal, ou seja, foi gerado um único espectro com um tempo total de aquisição de dados de 2000 s. Com isto melhorou-se substancialmente a estatística de contagens, possibilitando a realização de uma regressão linear dos dados de maior energia do espectro medido. Para os cálculos de incerteza foram considerados incertezas padrão dos parâmetros  $A$  e  $B$  de um ajuste de regressão linear (Equação 20) fornecidos pelo programa computacional Microcal Origin 6.0<sup>®</sup>.

$$y = A + B \cdot x \quad (19)$$

#### 4.6. Calibração da câmara de ionização 10X5-6

A calibração da câmara de ionização Radcal Corporation 10X5-6 foi realizada através da comparação de sua resposta nos feixes de raios-x com a resposta da câmara de ionização padrão de referência Radcal Corporation RC6. Esta calibração foi realizada para as três radiações de referência nas duas condições de filtrações em que foram implantadas (alta e baixa pureza) e a resposta foi comparada em termos de kerma no ar na faixa de 250 a 600  $\mu\text{Gy/s}$ .

Para a realização da calibração posicionou-se o centro do volume sensível da câmara RC6 no centro do campo de radiação a uma distância de 1,0 metro do ponto focal do tubo de raios-x; a câmara foi fixada em um suporte de acrílico, com seu eixo longitudinal perpendicular ao campo.

Ao lado da câmara padrão de referência, no mesmo suporte de acrílico, mas fora do campo de radiação (25 cm), posicionou-se a câmara 10X5-6, com seu volume sensível perpendicular ao ponto focal do equipamento de raios-x (Figura 31), de modo que, através do deslizamento do suporte sobre um trilho foi possível reproduzir a mesma geometria de irradiação para as duas câmaras, no centro do campo de radiação.

Na frente do colimador do tubo de raios-x (a) foi posicionada uma câmara de monitoração (b) com o objetivo de corrigir possíveis variações da taxa de kerma no ar durante as medições.

Entre o ponto focal do equipamento de raios-x e as câmaras de ionização foi posicionado um colimador adicional (c), com o objetivo de reduzir a influência da radiação espalhada nas medições.

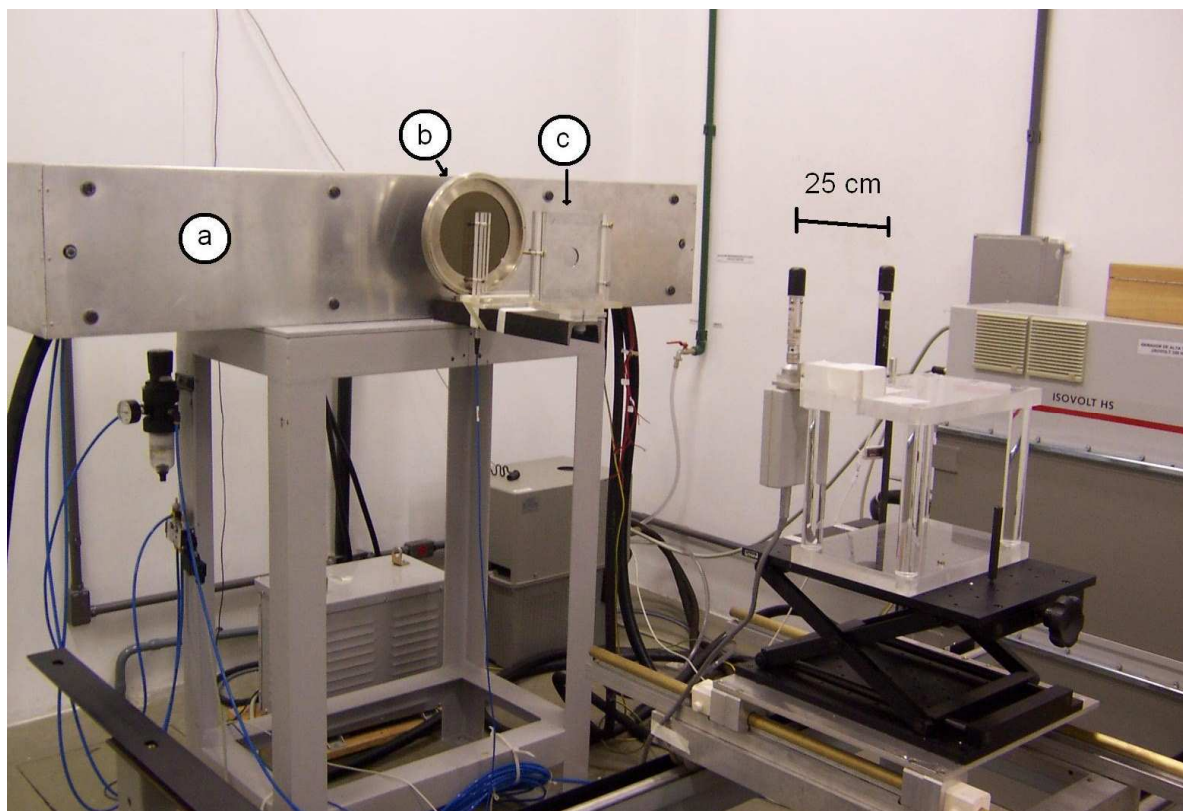


Figura 31 .Posicionamento das câmaras de ionização para o procedimento de calibração.

Com a câmara RC6 realizou-se 10 leituras de carga elétrica acumulada em intervalos de tempo de 30 s. A média da taxa de kerma no ar foi calculada através da equação 21, que corrige as leituras individualmente para variações de temperatura e pressão; esta grandeza foi chamada de  $\dot{K}_{ar,R}$  (que representa o valor verdadeiro convencional do kerma no ar de referência).

$$\dot{K}_{ar,R} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{L_i}{t} \right) \cdot \left( \frac{T + 273,15}{293,15} \right) \cdot \left( \frac{101,325}{P} \right) \cdot N_k \cdot k_{Q,Q_0} \cdot 10^3 \right]}{n} \quad (20)$$

onde:  $\dot{K}_{ar,R}$  é a média da taxa de kerma no ar de referência em  $\mu\text{Gy/s}$ ;

$L_i$  é a leitura em nC;

$t$  é o tempo de integração em s;

$T$  é a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$  no momento da medição;

$P$  é a pressão atmosférica em kPa no momento da medição;



$N_k$  é o coeficiente de calibração em termos de kerma no ar da câmara Radcal Corporation RC6 em mGy/nC;

$k_{Q,Q_0}$  é o fator de correção para a radiação de referência em questão;

$n$  é a quantidade de leituras realizadas (10 leituras).

Com a câmara de monitoração foram realizadas 10 medições integradas, com o tempo de 30 segundos concomitantemente às leituras com a câmara RC6. O valor da média da taxa de leitura da câmara de monitoração ( $q_0$ ) foi considerado como referência e foi utilizado para correção das leituras da taxa de kerma no ar com a câmara Radcal Corporation 10X5-6.

Logo após a realização deste primeiro conjunto de medições, a câmara 10X5-6 foi posicionada no lugar da câmara padrão de referência; realizou-se 10 medições de 30 segundos e calculou-se a média da leitura ( $\dot{L}$ ) através da seguinte equação:

$$\dot{L} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{L_i}{t} \right) \cdot \left( \frac{T + 273,15}{293,15} \right) \cdot \left( \frac{101,325}{P} \right) \cdot 10^3 \right]}{n} \quad (21)$$

onde:  $\dot{L}$  é a média da taxa de leitura em  $\mu\text{Gy/s}$ .

$L_i$  é a leitura em mGy;

$t$  é o tempo de integração em segundos;

$T$  é a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$  no momento da medição;

$P$  é a pressão atmosférica em kPa no momento da medição;

$n$  é a quantidade de leituras realizadas (10 leituras).

As medições realizadas com a câmara 10X5-6 foram corrigidas através de 10 leituras realizadas com a câmara de monitoração ( $q$ ), em intervalos de tempo de 30 segundos através da seguinte equação:

$$\dot{L}_c = \dot{L} \cdot \frac{q_0}{q} \quad (22)$$

Onde:  $\dot{L}_c$  é a média taxa de leitura em  $\mu\text{Gy/s}$ , corrigida pela leitura da câmara de monitoração;

$\dot{L}$  é a média das taxas de leitura em  $\mu\text{Gy/s}$ ;

$q_0$  é a média das leituras de referência da câmara de monitoração em  $\mu\text{C/s}$ ;

$q$  é a média das leituras da câmara de monitoração, quando acionada juntamente com a câmara 10X5-6 em  $\mu\text{C/s}$ .

O coeficiente de calibração da câmara 10X5-6 ( $N_k$ ), para cada radiação de referência, foi obtido através da seguinte equação:

$$N_k = \frac{\dot{K}_{ar,R}}{\dot{L}_c} \quad (23)$$

Onde:  $\dot{K}_{ar,R}$  é a média das taxas de kerma no ar de referência em  $\mu\text{Gy/s}$ ;

$\dot{L}_c$  é a média das taxas de kerma no ar em  $\mu\text{Gy/s}$ , corrigida pela leitura da câmara de monitoração.

Após a determinação do coeficiente de calibração calculou-se um fator de correção tomando-se como base a radiação de referência RQR6 implantada com filtros de alta pureza de modo a comparar a resposta da câmara nos diferentes feixes de raios-x. Este fator de correção foi calculado através da seguinte equação:

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_k(RQR6)}{N_k} \quad (24)$$

onde:  $N_k$  (RQR6) é o coeficiente de calibração da RQR6 implantada com filtros de alta pureza;

$N_k$  é o fator de calibração da RQR que se deseja comparar.

Deve-se salientar que a Agência Internacional de Energia Atômica recomenda a RQR5 como base para a definição do coeficiente de calibração (IAEA,2007), porém esta radiação de referência não foi considerada na realização do trabalho, uma vez que as demais RQR's abrangeram toda a faixa de energia de interesse.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Determinação da Filtração Inerente

Os resultados obtidos através da realização do teste de determinação da influência da radiação espalhada pelo suporte de posicionamento dos filtros (conforme item 4.1) estão descritos na Tabela 3, que mostra a leitura do kerma no ar em mGy, o tempo de exposição para cada leitura e a taxa de kerma no ar medidos pela câmara de ionização Radcal 10X5-6 com o suporte dos atenuadores ( $L_{CS}$ ) e sem o suporte dos atenuadores ( $L_{SS}$ ).

**Tabela 3. Teste de determinação da influência da radiação espalhada pelo suporte dos filtros, a 60 kV.**

MEDIDAS	LCS			LSS		
	Leitura (mGy)	Tempo (s)	Taxa (mGy/s)	Leitura (mGy)	Tempo (s)	Taxa (mGy/s)
1	155,300	59,960	2,590	155,200	60,110	2,582
2	155,300	59,890	2,593	155,100	60,030	2,584
3	155,400	59,770	2,600	155,300	60,110	2,584
4	155,400	59,830	2,597	155,200	59,870	2,592
5	155,500	59,910	2,596	155,300	59,930	2,591
6	155,400	60,080	2,587	155,400	59,970	2,591
7	155,300	60,170	2,581	155,700	60,050	2,593
8	155,300	59,870	2,594	155,700	60,070	2,592
9	155,400	59,870	2,596	155,700	59,870	2,601
10	155,300	59,810	2,597	155,700	59,940	2,598
Média	155,360	59,916	2,593	155,430	59,995	2,591
Desv.Pad.(%)	0,045	0,207	0,218	0,158	0,153	0,234

O valor da influência da radiação espalhada  $I_r$  (equação 12) pelo suporte dos filtros foi de 0,087 %, portanto o suporte utilizado para o posicionamento dos filtros contribui de maneira desprezível para o espalhamento do feixe primário de radiação, o que torna os dados coletados mais confiáveis.

Os dados para determinação da CSR no modo de medição do eletrômetro de kerma no ar integrado (Tabela 4) e para o modo de medição de taxa de kerma no ar

(Tabela 5), mostram a média da taxa de kerma no ar e os valores de intensidade percentual de radiação registrada pelo conjunto câmara-eletrômetro antes e após a adição das várias espessuras de filtros.

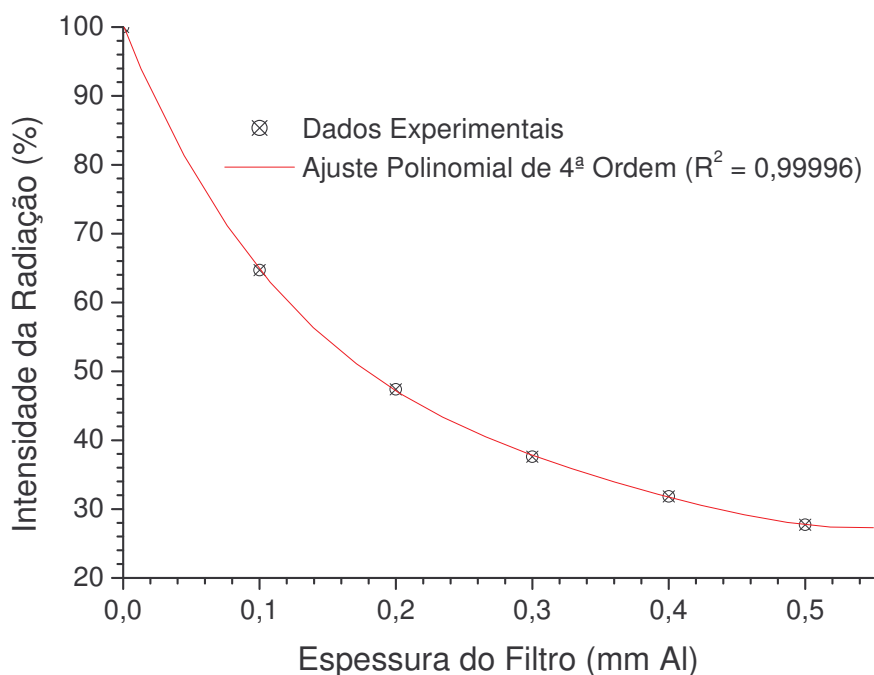
**Tabela 4. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo kerma no ar integrado, para diferentes espessuras de filtros de alumínio.**

<b>Espessura do Filtro</b> <b>(mm Al)</b>	<b>Média da Taxa de Kerma no Ar</b> <b>(mGy/s)</b>	<b>Intensidade da Radiação</b> <b>(%)</b>
0,000	2,830	100,000
0,100	1,831	64,700
0,200	1,341	47,385
0,300	1,064	37,597
0,400	0,901	31,837
0,500	0,784	27,703

**Tabela 5. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo taxa de kerma no ar, para diferentes espessuras de filtros de alumínio.**

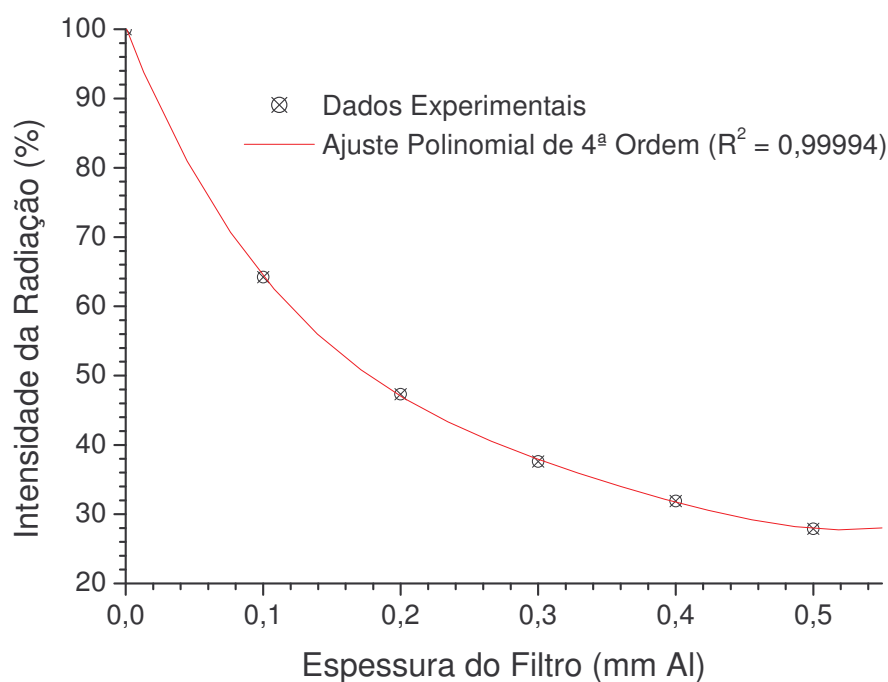
<b>Espessura do Filtro</b> <b>(mm Al)</b>	<b>Média da Taxa de Kerma no Ar</b> <b>(mGy/s)</b>	<b>Intensidade da Radiação</b> <b>(%)</b>
0,000	2,853	100,000
0,100	1,832	64,213
0,200	1,350	47,319
0,300	1,073	37,610
0,400	0,910	31,896
0,500	0,796	27,900

Com estes dados foram feitos dois gráficos que mostram as curvas de atenuação da radiação em função da adição de filtros de alumínio de várias espessuras com o eletrômetro sendo utilizado no modo kerma no ar integrado (Figura 32) e no modo taxa de kerma no ar (Figura 33).



**Figura 32. Curva de atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo integrado.**

O valor da camada semi-redutora para o sistema de medição de kerma no ar integrado foi de  $(0,178 \pm 0,007)$  mm Al, a incerteza foi calculada levando-se em consideração as piores condições com fator de abrangência  $k$  igual a 2, para um intervalo de confiança 95,45 % dos dados.



**Figura 33. Curva de atenuação da intensidade do feixe de raios-x, a 60 kV, no modo taxa.**

O valor da camada semi-redutora para o sistema de medição de taxa de kerma no ar foi de  $(0,177 \pm 0,007)$  mm Al, a incerteza foi calculada levando-se em consideração as piores condições com fator de abrangência  $k$  igual a 2, para um intervalo de confiança de 95,45 %.

Diante dos resultados, para medições em equipamentos de raios-x que emitem radiação continuamente, pode-se utilizar o eletrômetro Radcal modelo 9015 em qualquer um dos modos de operação (integrado ou taxa), pois as diferenças são desprezíveis nos valores medidos entre um ou outro modo de medição.

Os valores de CSR encontrados nos dois modos de medição do eletrômetro apresentaram diferença somente na terceira casa decimal, ficando menor do que 0,56 %.

Esta diferença, conforme verificado na medida da taxa de kerma no ar descrita na tabela 3, foi considerada satisfatória, uma vez que, em medições que permitam a utilização do eletrômetro em qualquer um dos modos de leitura, fica mais prática e dinâmica a sua utilização no modo de contagem em taxa de kerma no ar. Esse modo de contagem permite que a mesma quantidade de dados seja coletada em um intervalo de tempo muito menor em relação ao modo de contagem integrado.

A Tabela 6 mostra a correlação entre a CSR, medida com tensão de 60 kV, e a filtração inerente ( $F_I$ ) do tubo de raios-x, ambas em milímetros de alumínio. É importante salientar que a tabela da ISO permite o cálculo da filtração inerente para tubos que apresentem o valor da CSR maior ou igual a 0,33 mmAl, portanto foi realizada uma extrapolação da curva gerada pelos dados da tabela (Equação 26), de forma a tornar possível o cálculo da filtração inerente para um tubo com CSR menor que 0,33 mmAl. A equação foi obtida realizando-se um ajuste polinomial de quinta ordem que obteve um  $R^2$  de 0,99995.

**Tabela 6. Correlação entre a CSR, a 60 kV, e a filtração inerente do tubo de raios-x (ISO, 1996-b)**

CSR (mmAl)	Filtração Inerente (mmAl)
0,33	0,25
0,38	0,30
0,54	0,40
0,67	0,50
0,82	0,60
1,02	0,80
1,15	1,00
1,54	1,50
1,83	2,00
2,11	2,50
2,35	3,00
2,56	3,50
2,75	4,00
2,94	4,50
3,08	5,00
3,35	6,00
3,56	7,00

$$F_i = 0,024 \text{ CSR}^5 - 0,169 \text{ CSR}^4 + 0,441 \text{ CSR}^3 - 0,103 \text{ CSR}^2 + 0,519 \text{ CSR} + 0,087 \quad (25)$$

O valor da filtração inerente encontrado foi de  $(0,178 \pm 0,011)$  mm Al com a incerteza expandida calculada para um fator de abrangência k igual a 2 para um intervalo de confiança de 95,45 % dos dados.

Como o valor de filtração inerente foi obtido através da extrapolação dos dados da ISO foram realizados novos cálculos de filtração inerente do equipamento de raios-x, porém, em condições de interpolação dos dados da Tabela 6. Para isso foram adicionadas três espessuras conhecidas de alumínio ao equipamento de raios-x (0,800 mmAl, 2,000 mmAl e 3,190 mmAl), e os valores da “filtração inerente” foram obtidos com a mesma metodologia proposta pela ISO.

Quando adicionado ao equipamento de raios-x uma filtração de 0,800 mmAl o valor da filtração inerente encontrado foi de  $(0,173 \pm 0,041)$  mmAl. Para a filtração adicional de 2,000 mmAl, o valor da filtração inerente foi de  $(0,125 \pm 0,104)$  mmAl e



para a filtração adicional de 3,190 mmAl o valor da filtração inerente foi de  $(0,077 \pm 0,144)$  mmAl. Todas as incertezas expandidas foram calculadas com um fator de abrangência  $k$  igual a 2, para um intervalo de confiança de 95,45% dos dados. As fontes que mais contribuíram para o valor da incerteza expandida foram a incerteza em relação à dependência energética da câmara de ionização utilizada e a incerteza na espessura dos filtros de alumínio.

A partir da análise dos dados é possível ressaltar que quanto maior a quantidade de alumínio adicionado ao equipamento de raios-x, maior a incerteza dos dados obtidos no cálculo da filtração inerente. Na combinação das incertezas, as relativas aos filtros adicionados afetam significativamente as incertezas expandidas da filtração inerente, chegando-se ao fato incoerente de se obter dados negativos para esta, o que não é fisicamente possível.

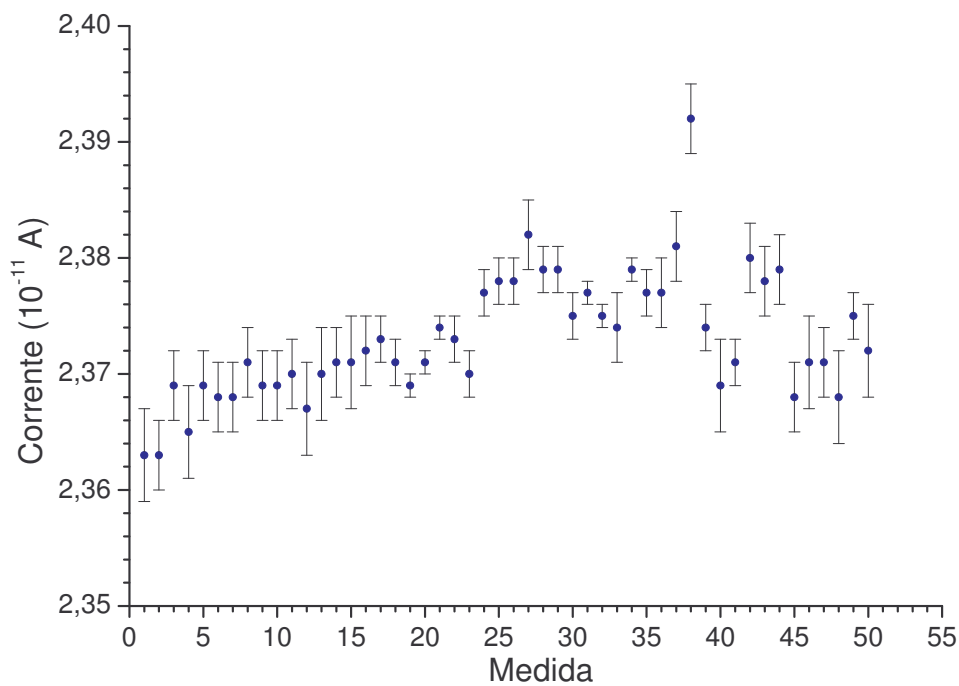
Portanto, para fins de cálculos, nos experimentos realizados com este equipamento de raios-x, o valor da filtração inerente será considerado como de  $(0,173 \pm 0,041)$  mmAl. Este valor foi encontrado da forma mais coerente, pois a quantidade de filtração adicionada ao equipamento foi a de menor valor para se conseguir a interpolação dos dados da ISO e seu valor apresentou uma diferença de apenas 2,81 % em relação ao valor obtido com a extrapolação dos dados.

O baixo valor encontrado para a filtração inerente do tubo de raios-x é um indicativo dos baixos valores de energia de seu espectro, podendo ser utilizado para outros cálculos com objetivos de implantação de qualidades de baixas energias recomendadas por normas aplicáveis.

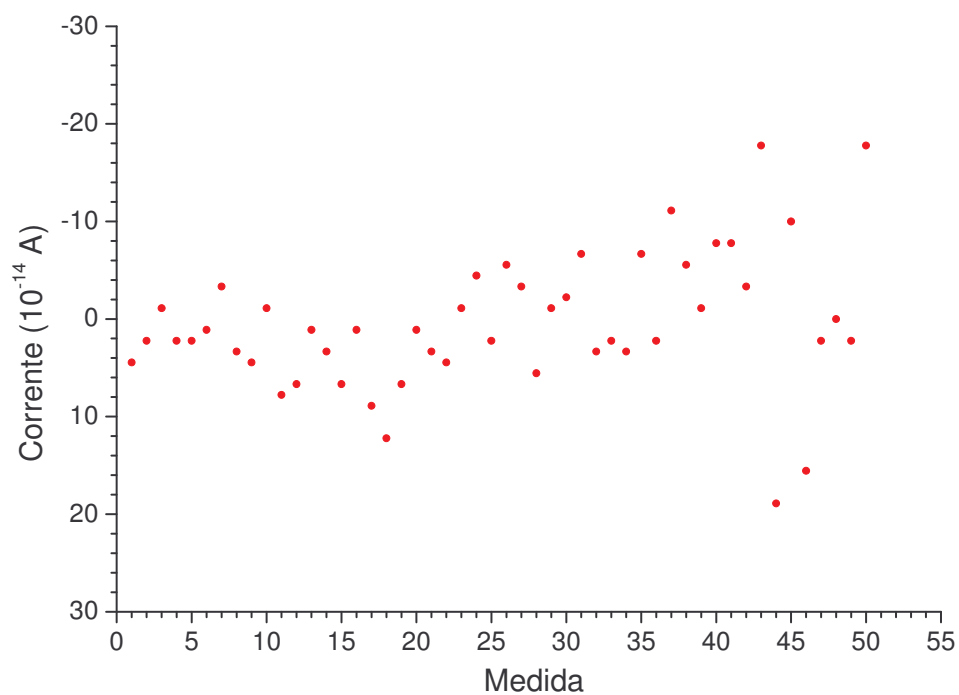
## **5.2. Verificação da Estabilidade da Resposta da Câmara de Ionização RC6**

A Figura 34 mostra a estabilidade da resposta da câmara de ionização RC6 em função de um mesmo estímulo gerado pela fonte  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$  com seus respectivos desvios padrão. As correntes de fuga do sistema câmara-eletrômetro para cada uma

das medições estão mostradas na Figura 35, ambos os testes realizados conforme especificado no item 4.2.



**Figura 34. Estabilidade da resposta da câmara RC6 em função de um mesmo estímulo gerado pela fonte padrão.**



**Figura 35. Correntes de fuga do sistema câmara-eletrômetro.**

É importante salientar que a câmara de ionização apresentou uma adequada repetitividade das medidas, ficando abaixo de 0,20% e a reprodutibilidade de 0,23% para as cinquenta medições realizadas durante todo o período, demonstrando a grande estabilidade do sistema de medição.

As correntes de fuga geradas por sinais elétricos espúrios do sistema de medição e por radiações de fundo apresentaram valores que não ultrapassaram 0,08% da medição de corrente elétrica gerada pela fonte  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ , que também é um bom indicativo de estabilidade do sistema, o que aumenta ainda mais a confiabilidade metrológica das medições realizadas com este conjunto de câmara de ionização e eletrômetro.

### **5.3. Verificação da Uniformidade e do Tamanho do Campo de Radiação**

Conforme especificado no item 4.3 as características da uniformidade e do tamanho do campo de radiação gerado pelo foco grosso com filtração inerente de 0,17 mm Al e tensão de 80 kV são apresentados na Figura 36 e pelo foco fino na Figura 37, que mostram a intensidade relativa do feixe de raios-x em cada ponto da matriz criada, sendo possível determinar a uniformidade do feixe de radiação em cada situação.

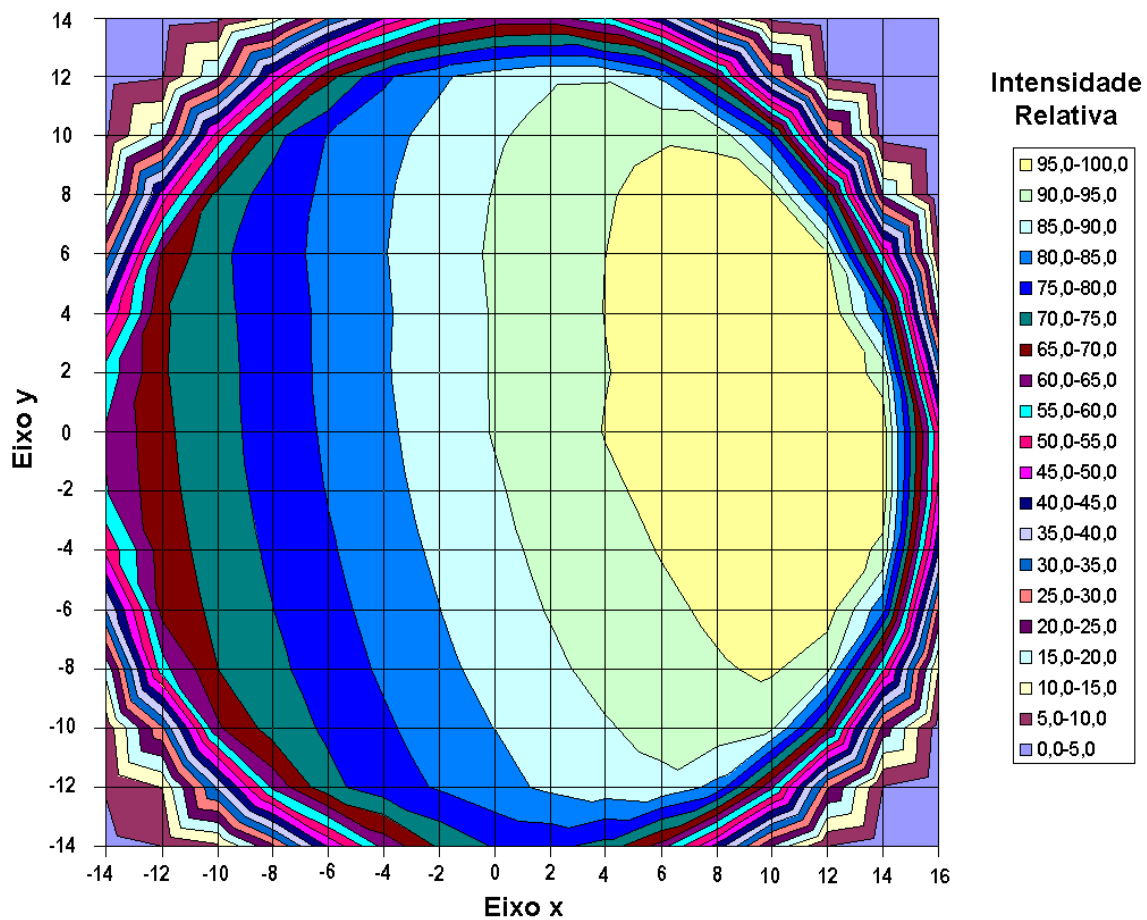
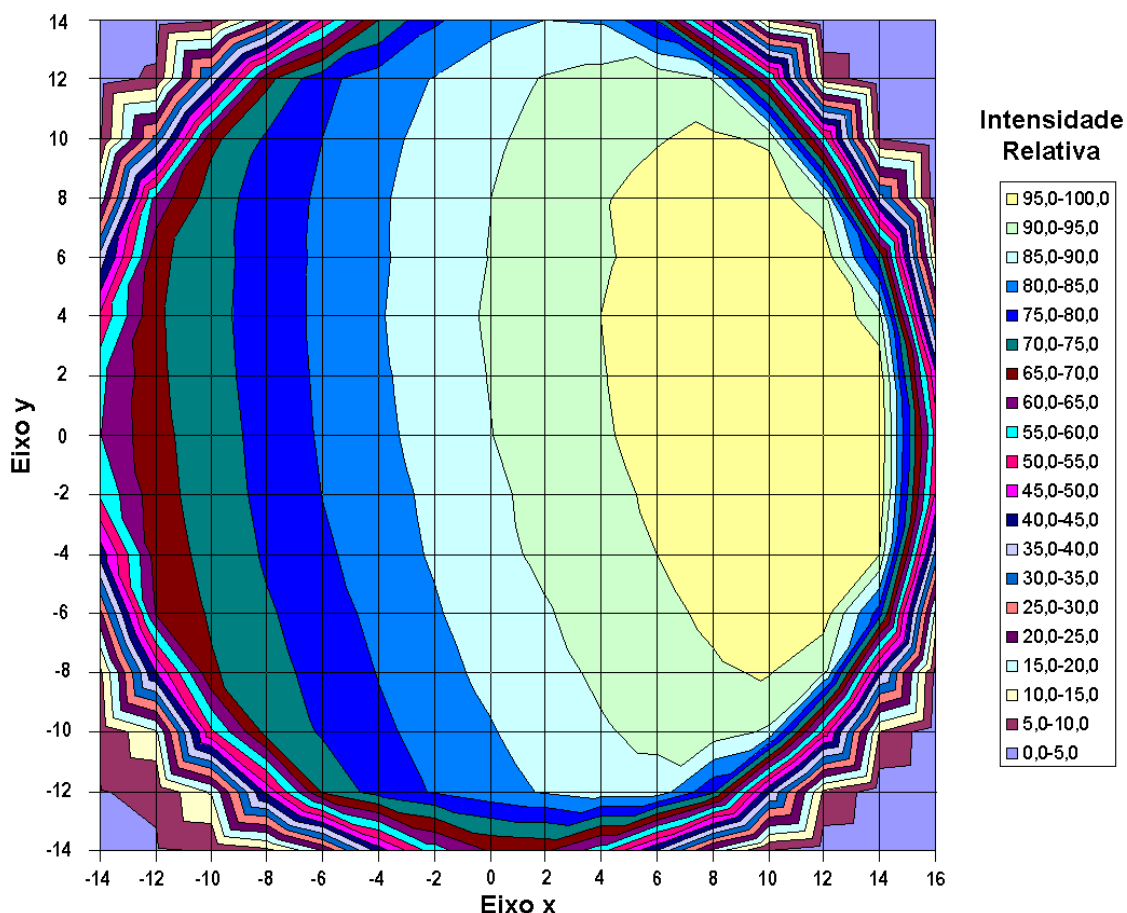


Figura 36. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco grosso para a tensão de 80 kV.



**Figura 37. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco fino para a tensão de 80 kV.**

Através da análise dos campos de radiação gerados pelos focos fino e grosso com filtração inerente de 0,17 mm Al e tensão de 80 kV observa-se que a intensidade da radiação decresce lentamente da direita para a esquerda do campo na direção do eixo  $x$ . Este fato se deve ao efeito Heel, que é definido como a diminuição da intensidade da radiação do lado do anodo devido à formação dos raios-x dentro deste, sofrendo atenuações (BUSHONG, 2004).

É possível observar que a intensidade do feixe de raios-x decresce muito rapidamente nas bordas do campo (eixos  $x$  e  $y$ ), fato que se deve ao término do campo de radiação quando este é blindado pelo chumbo que envolve o tubo de raios-x.

A distribuição espacial do campo de radiação gerado com a utilização do foco grosso ficou similar ao gerado pelo foco fino em termos de intensidade relativa de radiação.

Este fato sugere que os campos de radiação gerados em ambas as situações estão com o mesmo alinhamento, uniformidade e homogeneidade. Porém a calibração de equipamentos nestes campos de radiação não é adequada, a baixa filtração do feixe de raios-x implica em coeficientes de homogeneidade abaixo dos estabelecidos por normas aplicáveis. Também se observa que para uma uniformidade de 95 %, como exigido pela ISO, o campo de radiação apresenta dimensões muito reduzidas.

As características do campo de radiação gerado pelo foco grosso com filtração de 2,98 mm Al são apresentados na Figura 38 e pelo foco fino na Figura 39, que mostram a intensidade relativa do feixe de raios-x em cada ponto da matriz criada, sendo possível determinar a uniformidade do feixe de radiação em cada situação para a tensão de 80 kV, correspondendo à radiação de referência RQR6.

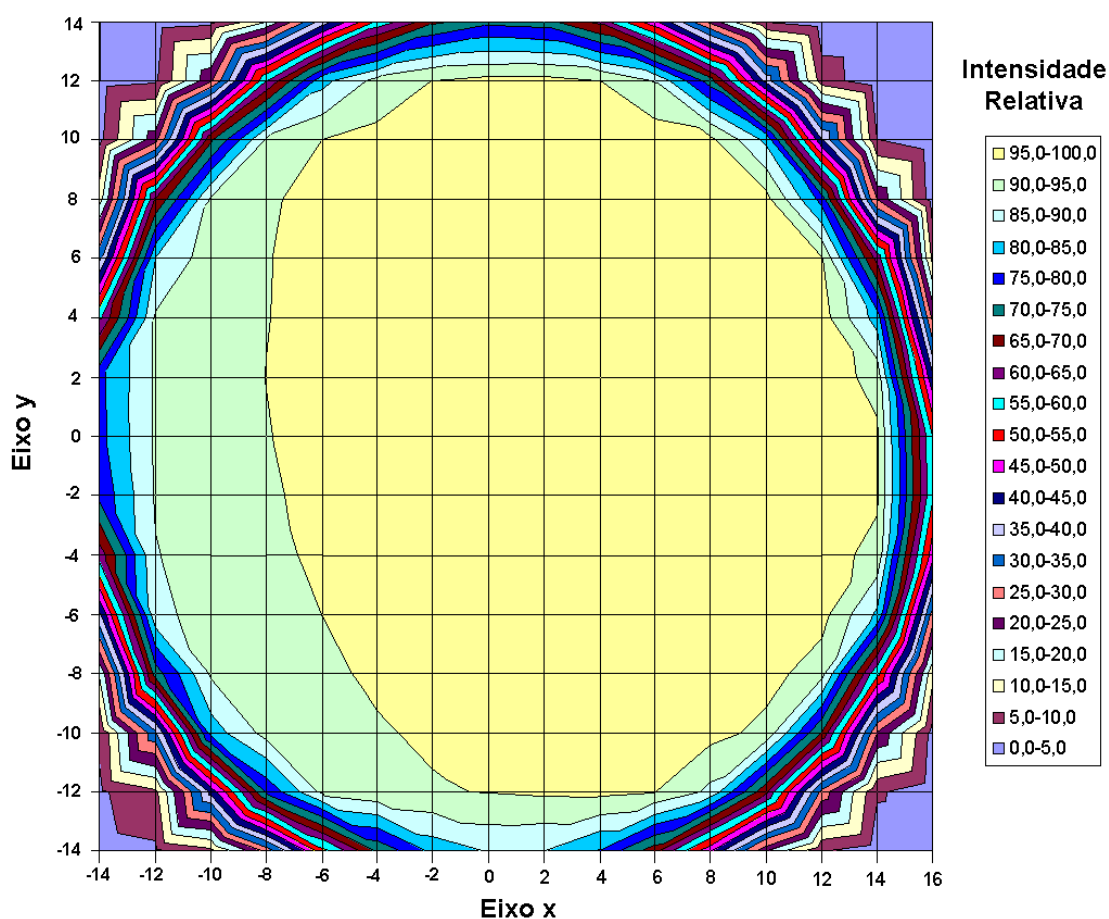
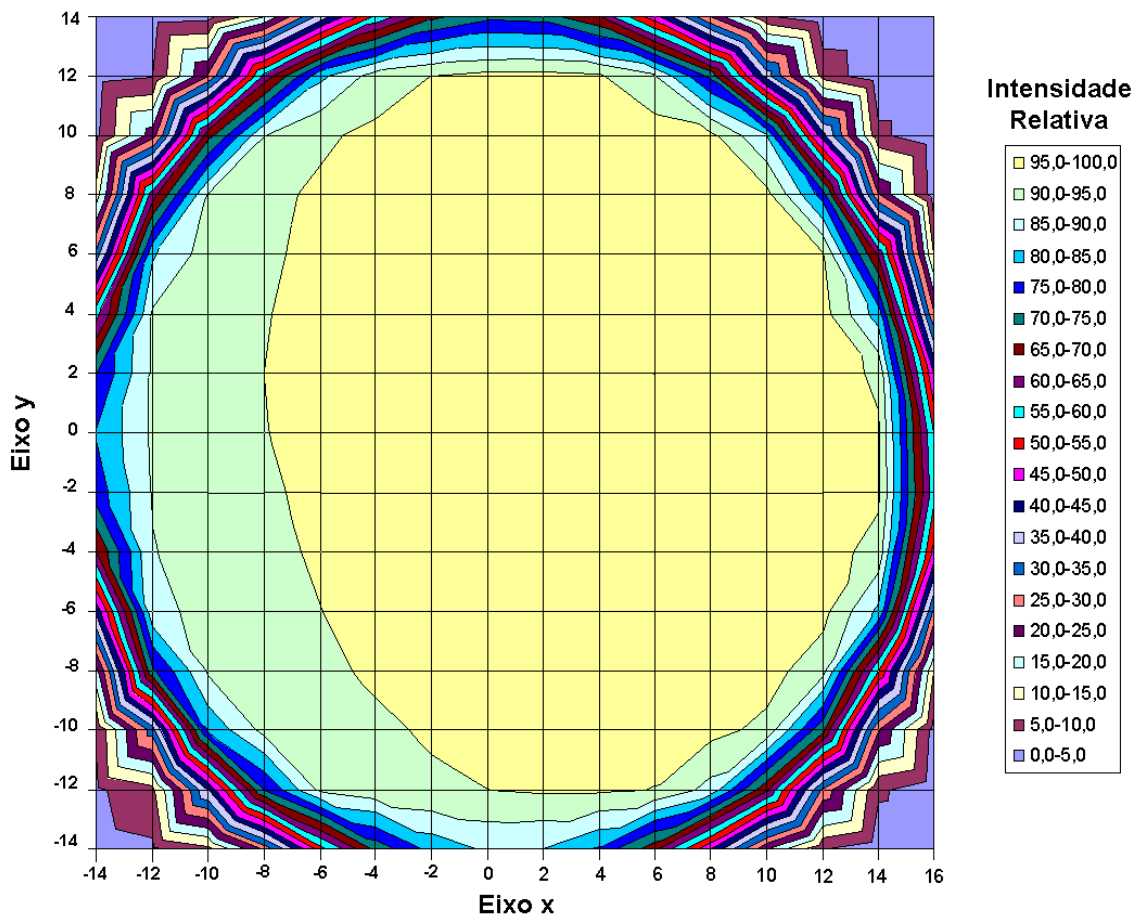


Figura 38. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco grosso e 2,98 mmAl para a tensão de 80kV, correspondente à RQR6.



**Figura 39. Uniformidade do campo de radiação produzido com o foco fino e 2,98 mmAl para a tensão de 80kV, correspondente à RQR6.**

É possível observar que o acréscimo de filtração ao equipamento gera uma uniformização do campo de radiação, aumentando-se a área útil deste, cerca de três vezes em se tratando da filtração relativa à RQR6. Isto se deve pela grande quantidade de fótons de baixa energia no campo de radiação de maior intensidade, que agora são atenuados ou absorvidos, portanto fica demonstrada a importância da realização de calibrações somente sob condições específicas de radiações de referência exigidas por normas.

Também é bastante recomendável que, em se tratando de irradiações de detectores posicionados simultaneamente no campo de radiação, que eles sejam colocados na perpendicularmente à direção catodo-anodo, o que reduzirá erros causados pelo efeito Heel, ainda que o simples acréscimo de atenuadores de alumínio cause redução considerável dos inconvenientes causados por este efeito no campo de radiação.

Novamente o campo de radiação gerado com a utilização do foco grosso ficou muito similar ao gerado pelo foco fino em termos de intensidade relativa de radiação, sugerindo que os campos de radiação gerados em ambas as situações estão com o mesmo alinhamento, uniformidade e homogeneidade. Fato importantíssimo em termos de calibração de equipamentos.

#### **5.4. Implantação das Radiações de Referência da IEC**

##### ***5.4.1. Implantação da RQR 2 com filtros de alta e baixa pureza***

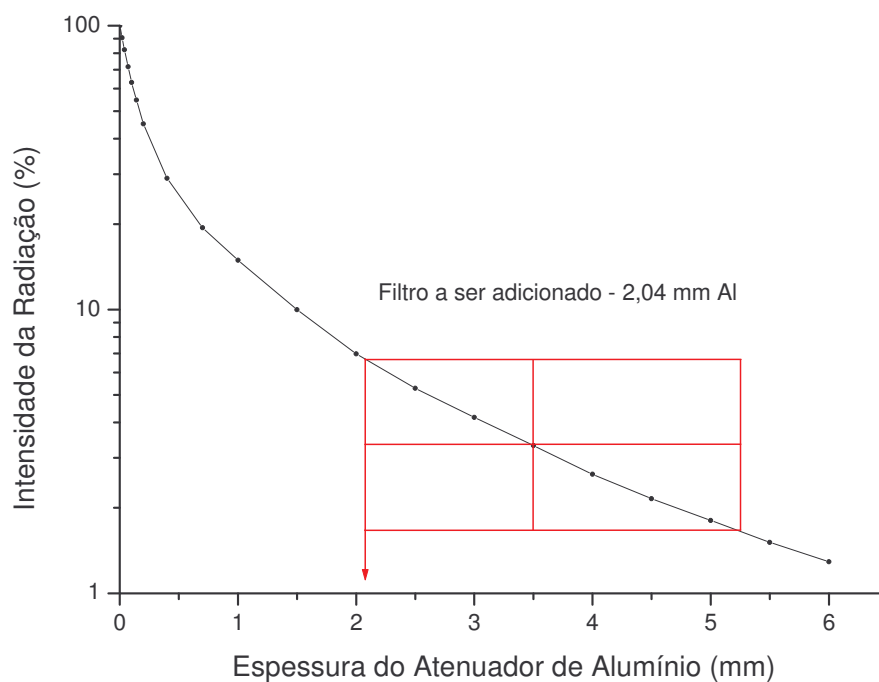
Os dados referentes à curva de atenuação do feixe de raios-x para a implantação da RQR2 com filtros de alta pureza estão na Tabela 7 e para a implantação desta com filtros de baixa pureza estão na Tabela 8. Ambas mostram a diminuição da intensidade relativa da radiação que chega à câmara de ionização à medida que filtros são adicionados, conforme especificado no item 4.4.

A Figura 40 mostra a curva de atenuação dos raios-x para a tensão nominal de 40,0 kV referente à RQR2 com a adição de filtros de alta pureza de alumínio e a Figura 41 mostra a curva de atenuação com a adição de filtros de baixa pureza de alumínio. Nas duas figuras o retângulo se encontra na posição adequada na curva.



**Tabela 7. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR2 com filtros de alta pureza.**

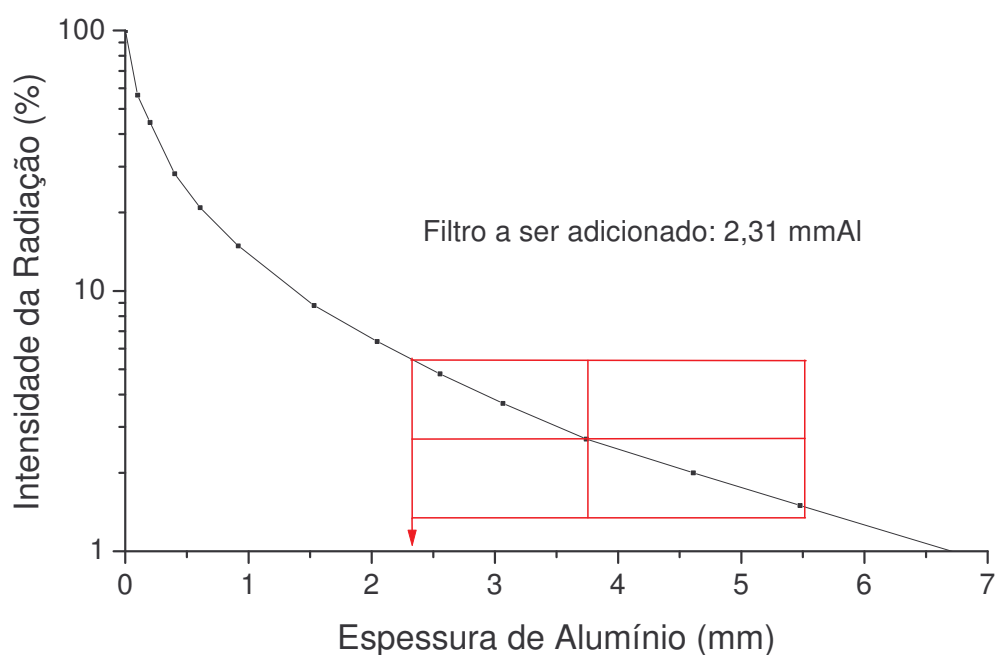
Ponto n°	Filtro (mmAl)	Intensidade (%)
1	0,00	100,00
2	0,02	90,63
3	0,04	82,21
4	0,07	71,74
5	0,10	63,05
6	0,14	54,71
7	0,20	45,12
8	0,40	29,01
9	0,70	19,42
10	1,00	14,90
11	1,50	9,99
12	2,00	6,97
13	2,50	5,28
14	3,00	4,17
15	3,50	3,32
16	4,00	2,63
17	4,50	2,16
18	5,00	1,81
19	5,50	1,51
20	6,00	1,29



**Figura 40. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 2 com filtros de alta pureza.**

**Tabela 8. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR2 com filtros de baixa pureza.**

Ponto n°	Filtro (mmAl)	Intensidade do Feixe(%)
1	0,00	100,00
2	0,10	62,10
3	0,20	44,42
4	0,40	28,22
5	0,61	20,87
6	0,92	14,94
7	1,53	8,79
8	2,04	6,37
9	2,55	4,81
10	3,06	3,73
11	3,74	2,73
12	4,61	1,99
13	5,48	1,48
14	7,03	0,91



**Figura 41. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 2 com filtros de baixa pureza.**

Encontrou-se um valor de filtração a ser adicionado no feixe principal de raios-x de 2,04 mm de alumínio para a tensão nominal de 40,0 kV referente à RQR2

implantada com filtros de alta pureza e 2,31 mm de alumínio para a RQR2 implantada com filtros de baixa pureza.

Após a adição da filtração de alumínio no feixe principal de radiação foi realizada a verificação da 1ª CSR e 2ª CSR de modo a obter o coeficiente de homogeneidade e comparar com os valores da norma IEC e foram obtidos os resultados da Tabela 9 referentes à implantação das radiações de referência com filtros de alta e baixa pureza:

**Tabela 9. Parâmetros de confirmação da implantação da radiação de referência RQR2.**

Pureza dos Filtros	ALTA	BAIXA
Tensão Nominal (kV)	40,0	
Filtração Adicionada (mm Al)	2,04	2,31
1ª CSR da IEC (mmAl)	1,42	
1ª CSR Experimental (mmAl)	1,40	1,43
Incerteza da 1ª CSR (%)	8,09	7,69
Coeficiente de Homogeneidade da IEC	0,81	
Coeficiente de Homogeneidade Experimental	0,78	0,80
Incerteza do Coeficiente de Homogeneidade (%)	11,45	10,87

O valor da 1ª CSR obtido com a implantação da RQR2 utilizando filtros de alta pureza apresentou uma diferença de 1,41% em relação ao recomendado e o valor do coeficiente de homogeneidade apresentou uma diferença de 0,03 (que representa 3,70%). Com a utilização de filtros de baixa pureza o valor da 1ª CSR obtido apresentou uma diferença de 0,70% em relação ao recomendado e o valor do coeficiente de homogeneidade apresentou uma diferença de 0,01 (que representa 1,25%), portanto todos os parâmetros encontram-se dentro dos limites exigidos pela IEC, independente da pureza dos filtros utilizados.

Para a realização dos cálculos de incerteza, uma análise que não é exigida pela norma (IEC, 2005), considerou-se as piores situações. Deve-se ressaltar que a pureza dos filtros não foi considerada uma fonte de incerteza, portanto não há qualquer relação entre valores de incerteza e composição dos filtros.

A Tabela 10 mostra as fontes de incerteza mais relevantes para o cálculo da incerteza da 1ª CSR e a Tabela 11 apresenta as fontes de incertezas mais relevantes no cálculo do CH obtidos com os filtros de alta pureza, nestas tabelas são apresentados os tipos de incerteza, suas distribuições de probabilidade, fatores de divisão e seus valores relativos

**Tabela 10. Fontes de incerteza da 1ª CSR da RQR2 implantada com filtros de alta pureza.**

Fonte de Incerteza	Tipo de Incerteza	Distribuição da Probabilidade	Divisor	Incerteza Relativa (%)
Termômetro ( Resolução )	B	Retangular	2	0,07
Termômetro ( Calibração )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,21
Transdutor de Pressão ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,01
Transdutor de Pressão ( Calibração )	B	Retangular	2,52	0,08
Câmara de Ionização ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,21
Câmara de Ionização ( Desvio Padrão )	A	Normal	$\sqrt{10}$	0,03
Câmara de Ionização (Dep. Energética)	B	Retangular	$\sqrt{3}$	4,03
Espessura dos Filtros	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,13
Valor da Incerteza Combinada		Normal		4,05
Valor da Incerteza Expandida		Normal (para k=2)		8,09

**Tabela 11. Fontes de incerteza do CH da RQR2 implantada com filtros de alta pureza.**

Fonte de Incerteza	Tipo de Incerteza	Distribuição da Probabilidade	Divisor	Incerteza Relativa (%)
Termômetro ( Resolução )	B	Retangular	2	0,10
Termômetro ( Calibração )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,29
Transdutor de Pressão ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,02
Transdutor de Pressão ( Calibração )	B	Retangular	2,52	0,12
Câmara Ionização ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,29
Câmara Ionização ( Desvio Padrão )	A	Normal	$\sqrt{10}$	0,05
Câmara Ionização (Dep. Energética)	B	Retangular	$\sqrt{3}$	5,70
Espessura dos Filtros	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,18
Valor da Incerteza Combinada		Normal		5,72
Valor da Incerteza Expandida		Normal (para k=2)		11,45

As incertezas expandidas foram calculadas para um fator de abrangência k igual a 2 em um intervalo de confiança de 95,45 %.

É importante salientar que os altos valores apresentados para as incertezas expandidas se devem à contribuição da dependência energética da câmara de ionização utilizada. Uma maneira de reduzir as incertezas expandidas na 1ª CSR e CH seria um estudo mais aprofundado da dependência energética na faixa de interesse ou a substituição do sistema de medição por outro que apresente menor dependência.

#### **5.4.2. Implantação da RQR 6 com filtros de alta e baixa pureza**

Os dados referentes à curva de atenuação do feixe de raios-x para a implantação da RQR6 com filtros de alta pureza estão na Tabela 12 e para a implantação desta com filtros de baixa pureza estão na Tabela 13. Ambas mostram a diminuição da intensidade relativa da radiação que chega à câmara de ionização à medida que filtros são adicionados.

A Figura 42 mostra a curva de atenuação dos raios-x para a tensão nominal de 80,0 kV referente à RQR6 com a adição de filtros de alta pureza de alumínio e a Figura 43 mostra a curva de atenuação com a adição de filtros de baixa pureza de alumínio. Nas duas figuras o retângulo se encontra na posição adequada na curva.

**Tabela 12. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR6 com filtros de alta pureza.**

Ponto n°	Filtro (mmAl)	Intensidade (%)
1	0,00	100,00
2	0,02	90,46
3	0,04	82,61
4	0,07	74,10
5	0,10	67,04
6	0,15	57,85
7	0,20	51,11
8	0,35	39,83
9	0,70	27,99
10	1,00	23,52
11	1,50	18,13
12	2,00	14,94
13	2,50	12,49
14	3,00	10,80
15	3,50	9,36
16	4,00	8,30
17	4,50	7,37
18	5,00	6,65
19	5,50	5,99
20	6,00	5,49
21	7,00	4,61
22	8,00	3,93
23	9,00	3,38
24	10,00	2,94
25	11,00	2,58
26	12,00	2,28
27	13,00	2,02
28	14,00	1,80
29	15,00	1,61
30	16,00	1,43

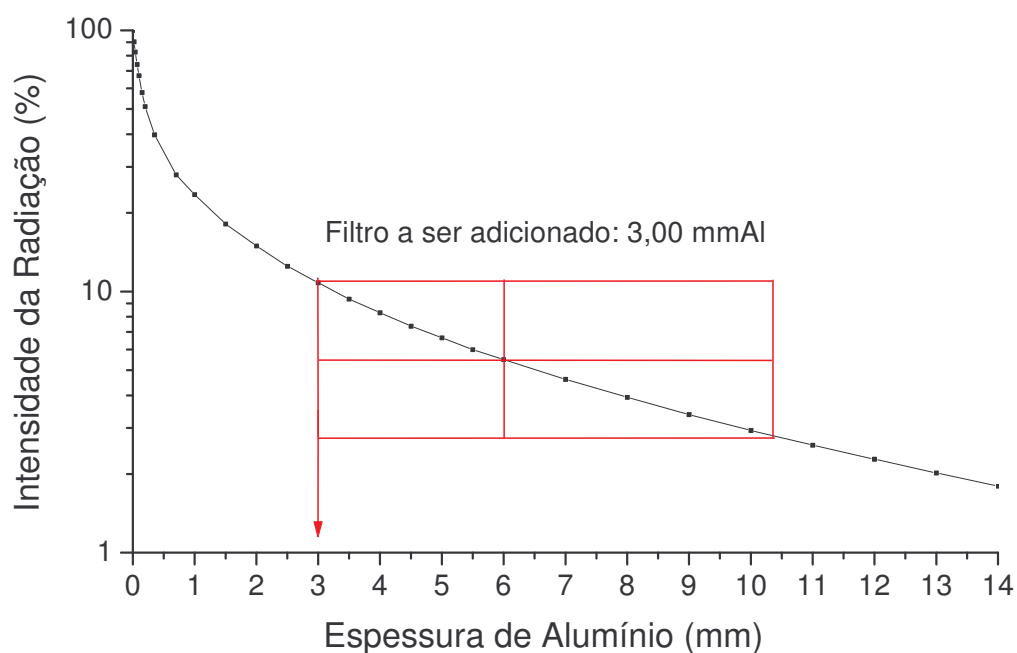
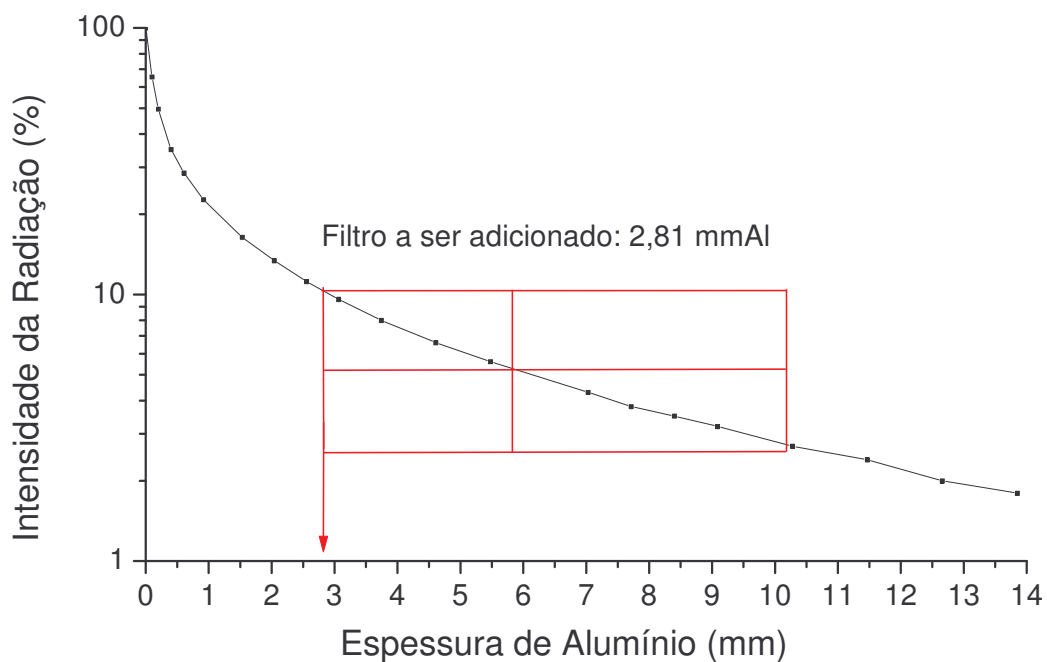


Figura 42. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 6 com filtros de alta pureza.

Tabela 13. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR6 com filtros de baixa pureza.

Ponto n°	Espessura (mmAl)	Intensidade do Feixe (%)
1	0,00	100,00
2	0,10	65,51
3	0,20	49,59
4	0,40	35,04
5	0,61	28,63
6	0,92	22,69
7	1,53	16,40
8	2,04	13,35
9	2,55	11,15
10	3,06	9,64
11	3,74	8,01
12	4,61	6,62
13	5,48	5,59
14	7,03	4,28
15	7,71	3,85
16	8,40	3,46
17	9,08	3,15
18	10,28	2,72
19	11,47	2,35
20	12,66	2,04
21	13,85	1,81



**Figura 43. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 6 com filtros de baixa pureza.**

Encontrou-se um valor de filtração a ser adicionado no feixe principal de raios-x de 3,00 mm de alumínio para a tensão nominal de 80,0 kV referente à RQR6 implantada com filtros de alta pureza e 2,81 mm de alumínio para a RQR6 implantada com filtros de baixa pureza.

Após a adição da filtração de alumínio no feixe principal de radiação foi realizada a verificação da 1ª CSR e 2ª CSR de modo a obter o coeficiente de homogeneidade e comparar com os valores da norma IEC e foram obtidos os resultados da Tabela 14 referentes à implantação das radiações de referência com filtros de alta e baixa pureza:



**Tabela 14. Resultados da confirmação da implantação da radiação de referência RQR 6.**

Pureza dos Filtros	ALTA	BAIXA
Tensão Nominal (kV)		80,0
Filtração Adicionada (mm Al)	3,00	2,81
1ª CSR da IEC (mmAl)		3,01
1ª CSR Experimental (mmAl)	3,02	3,00
Incerteza da 1ª CSR (%)	9,75	5,13
Coefficiente de Homogeneidade da IEC		0,69
Coefficiente de Homogeneidade Experimental	0,66	0,69
Incerteza do Coeficiente de Homogeneidade (%)	13,79	7,26

O valor da 1ª CSR obtido com a implantação da RQR6 utilizando filtros de alta pureza apresentou uma diferença de 0,33% em relação ao recomendado e o valor do coeficiente de homogeneidade apresentou uma diferença de 0,03 (que representa 4,35%). Com a utilização de filtros de baixa pureza o valor da 1ª CSR obtido também apresentou uma diferença de 0,33% em relação ao recomendado, porém o valor do coeficiente de homogeneidade não apresentou diferença, portanto todos os parâmetros encontram-se dentro dos limites exigidos pela IEC, independente da pureza dos filtros utilizados.

As incertezas expandidas, que são apresentadas na Tabela 14 foram calculadas para um fator de abrangência  $k$  igual a 2 em um intervalo de confiança de 95,45 %. Estes cálculos apresentaram valores elevados conforme já analisado no item anterior e as fontes de incerteza são similares às da Tabela 10.

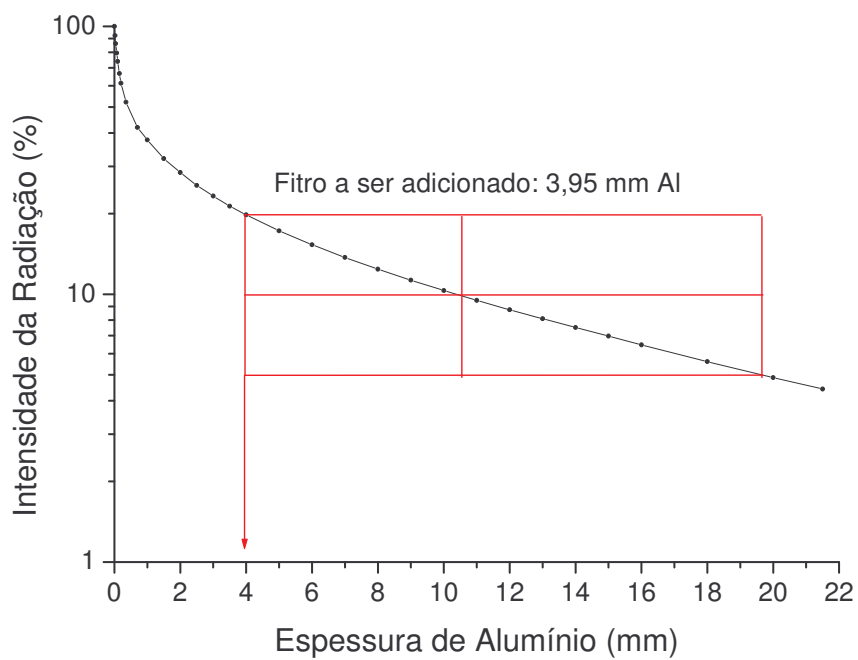
### **5.4.3. Implantação da RQR 10 com filtros de alta e baixa pureza**

Os dados referentes à curva de atenuação do feixe de raios-x para a implantação da RQR10 com filtros de alta pureza estão na Tabela 15 e para a implantação desta com filtros de baixa pureza estão na Tabela 16. Ambas mostram a diminuição da intensidade relativa da radiação que chega à câmara de ionização à medida que filtros são adicionados.

A Figura 44 mostra a curva de atenuação dos raios-x para a tensão nominal de 150,0 kV referente à RQR10 com a adição de filtros de alta pureza de alumínio e a Figura 45 mostra a curva de atenuação com a adição de filtros de baixa pureza de alumínio. Nas duas figuras o retângulo se encontra na posição adequada na curva.

**Tabela 15. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR10 com filtros de alta pureza.**

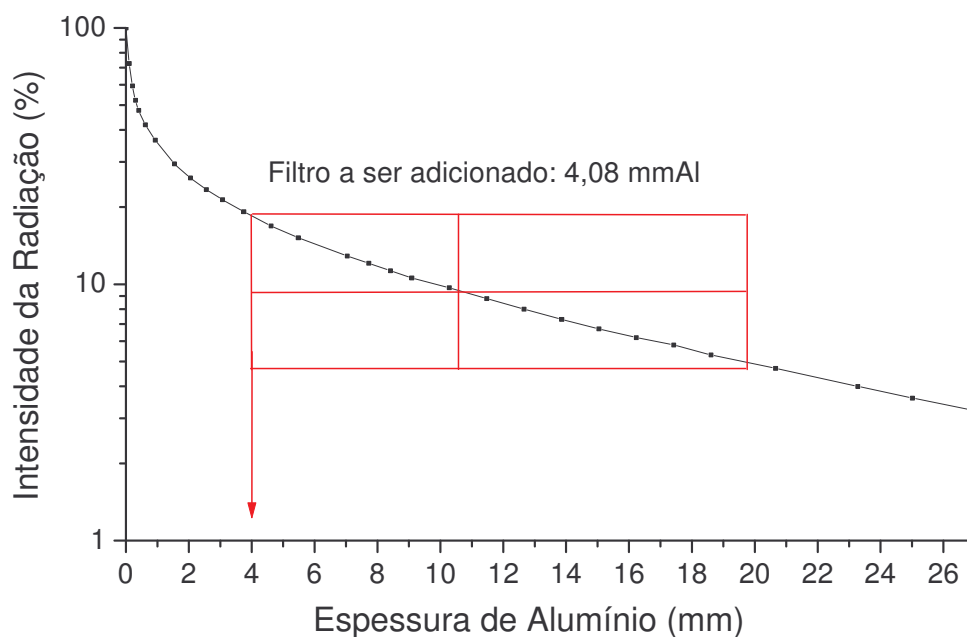
<b>Ponto n°</b>	<b>Filtro (mmAl)</b>	<b>Intensidade (%)</b>
1	0,00	100,00
2	0,02	92,36
3	0,04	86,26
4	0,07	79,58
5	0,10	73,98
6	0,15	66,71
7	0,20	61,30
8	0,35	52,13
9	0,70	41,92
10	1,00	37,66
11	1,50	32,09
12	2,00	28,46
13	2,50	25,47
14	3,00	23,24
15	3,50	21,30
16	4,00	19,77
17	5,00	17,24
18	6,00	15,30
19	7,00	13,72
20	8,00	12,40
21	9,00	11,27
22	10,00	10,32
23	11,00	9,48
24	12,00	8,75
25	13,00	8,10
26	14,00	7,51
27	15,00	6,97
28	16,00	6,47
29	18,00	5,60
30	20,00	4,88
31	21,50	4,42



**Figura 44. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 10 com filtros de alta pureza.**

**Tabela 16. Atenuação da intensidade do feixe de raios-x referente à RQR10 com filtros de baixa pureza.**

<b>Ponto n°</b>	<b>Espessura (mmAl)</b>	<b>Intensidade do Feixe(%)</b>
1	0,00	100,00
2	0,10	72,66
3	0,20	59,53
4	0,30	52,21
5	0,40	47,72
6	0,61	41,86
7	0,93	36,48
8	1,53	29,54
9	2,04	26,05
10	2,55	23,44
11	3,07	21,40
12	3,74	19,20
13	4,61	16,94
14	5,48	15,25
15	7,03	12,91
16	7,72	12,08
17	8,40	11,32
18	9,09	10,64
19	10,28	9,67
20	11,47	8,78
21	12,66	8,00
22	13,85	7,33
23	15,04	6,74
24	16,22	6,24
25	17,42	5,75
26	18,60	5,33
27	20,66	4,69
28	23,27	4,01
29	25,01	3,63
30	27,07	3,23



**Figura 45. Curva de atenuação para determinação da filtração a ser adicionada ao feixe de radiação para a implantação da RQR 10 com filtros de baixa pureza.**

Encontrou-se um valor de filtração a ser adicionado no feixe principal de raios-x de 3,95 mm de alumínio para a tensão nominal de 150,0 kV referente à RQR10 implantada com filtros de alta pureza e 4,08 mm de alumínio para a RQR10 implantada com filtros de baixa pureza.

Após a adição da filtração de alumínio no feixe principal de radiação foi realizada a verificação da 1ª CSR e 2ª CSR de modo a obter o coeficiente de homogeneidade e comparar com os valores da norma IEC e foram obtidos os resultados da Tabela 17 referentes à implantação das radiações de referência com filtros de alta e baixa pureza:

**Tabela 17. Resultados da confirmação da implantação da radiação de referência RQR 10.**

Pureza dos Filtros	ALTA	BAIXA
Tensão Nominal (kV)	150,0	
Filtração Adicionada (mm Al)	3,95	4,08
1ª CSR da IEC (mmAl)	6,57	
1ª CSR Experimental (mmAl)	6,47	6,71
Incerteza da 1ª CSR (%)	7,13	13,19
Coefficiente de Homogeneidade da IEC	0,72	
Coefficiente de Homogeneidade Experimental	0,69	0,69
Incerteza do Coeficiente de Homogeneidade (%)	10,09	18,66

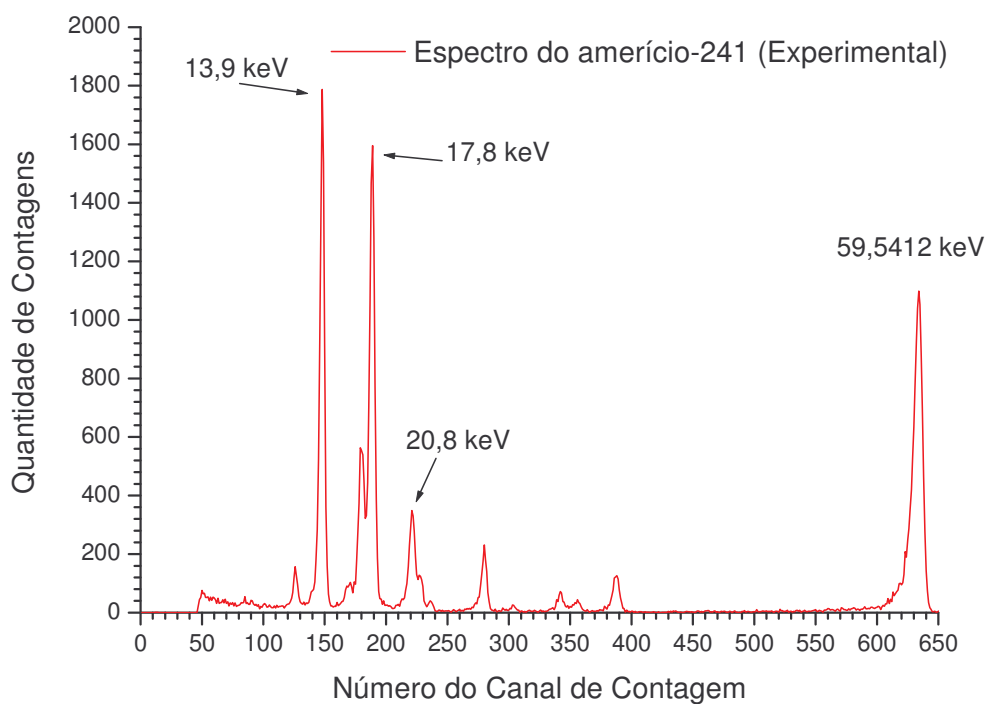
O valor da 1ª CSR obtido com a implantação da RQR10 utilizando filtros de alta pureza apresentou uma diferença de 1,52% em relação ao recomendado e o valor do coeficiente de homogeneidade apresentou uma diferença de 0,03 (que representa 4,17%). Com a utilização de filtros de baixa pureza o valor da 1ª CSR obtido apresentou uma diferença de 2,13% em relação ao recomendado, e o valor do coeficiente de homogeneidade também apresentou diferença de 0,03, portanto todos os parâmetros encontram-se dentro dos limites exigidos pela IEC 61267, independente da pureza dos filtros utilizados.

As incertezas expandidas, que são apresentadas na Tabela 17 foram calculadas para um fator de abrangência  $k$  igual 2 em um intervalo de confiança de 95,45 %. Estes cálculos apresentaram valores elevados conforme já analisado nos itens anteriores e as fontes de incerteza são similares às da Tabela 10.

## 5.5. Espectrometria das Radiações de Referência

### 5.5.1. Calibração do Sistema de Espectrometria

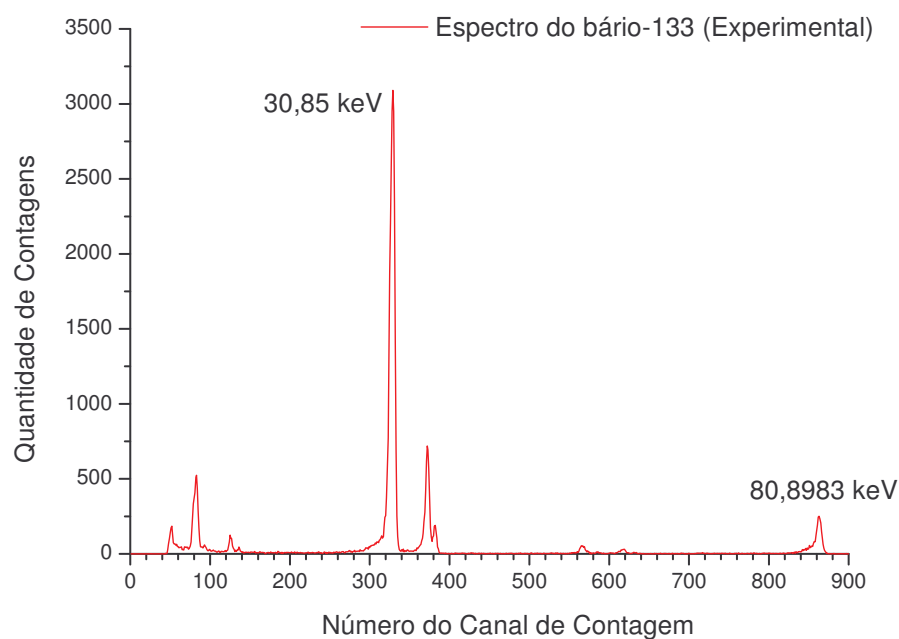
Os testes a seguir foram realizados conforme especificado no item 4.5. Para o amerício-241 encontrou-se o espectro de energias da Figura 46 que mostra a distribuição das contagens por canal de aquisição, além da indicação dos picos de energia utilizados para a calibração do espectrômetro.



**Figura 46. Espectro experimental do amerício-241 com a indicação dos picos de energia utilizados na calibração do espectrômetro.**

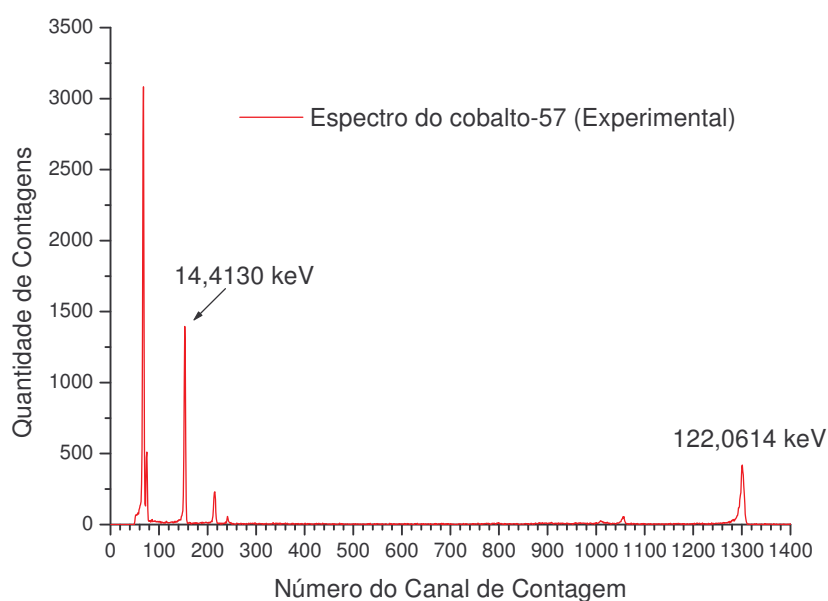
A Figura 47 mostra o espectro de energias do bário-133 com a distribuição de contagens por canal de aquisição de dados, além dos seus picos de energia utilizados para a calibração do espectrômetro:





**Figura 47. Espectro experimental do bário-133 com a indicação dos picos de energia utilizados na calibração do espectrômetro.**

A Figura 48 mostra o espectro de energias do cobalto-57 com a distribuição de contagens por canal de aquisição de dados, além dos picos de energia utilizados para a calibração do sistema espectrométrico.

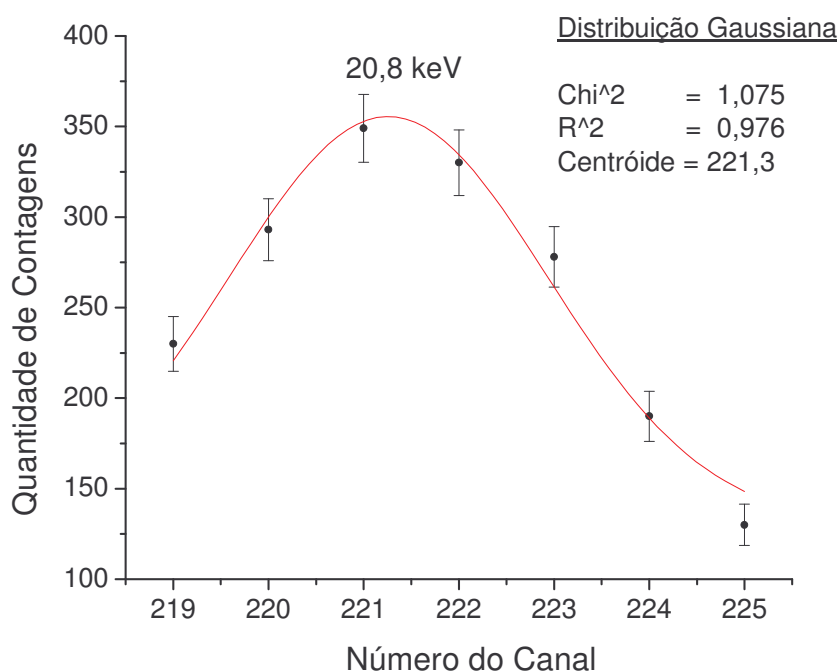


**Figura 48. Espectro experimental do cobalto-57 com a indicação dos picos de energia utilizados na calibração do espectrômetro.**

É importante salientar que alguns picos de energia foram desprezados em todos os espectros, pois a quantidade de energias escolhidas já é o suficiente para a determinação da reta de calibração do sistema de espectrometria ou a quantidade de contagens para a determinação destes foi insuficiente.

Para a determinação do canal referente às energias indicadas nos espectros das figuras anteriores, delimitou-se as contagens em torno do pico e foi realizada uma análise de distribuição gaussiana para verificação do centróide do pico de contagens, de modo a determinar o canal referente à respectiva energia.

A Figura 49 mostra um exemplo da determinação do centróide do pico proveniente de emissões de raios-x do amerício-241 com energia de 20,8 keV; o canal encontrado foi de 221,3.



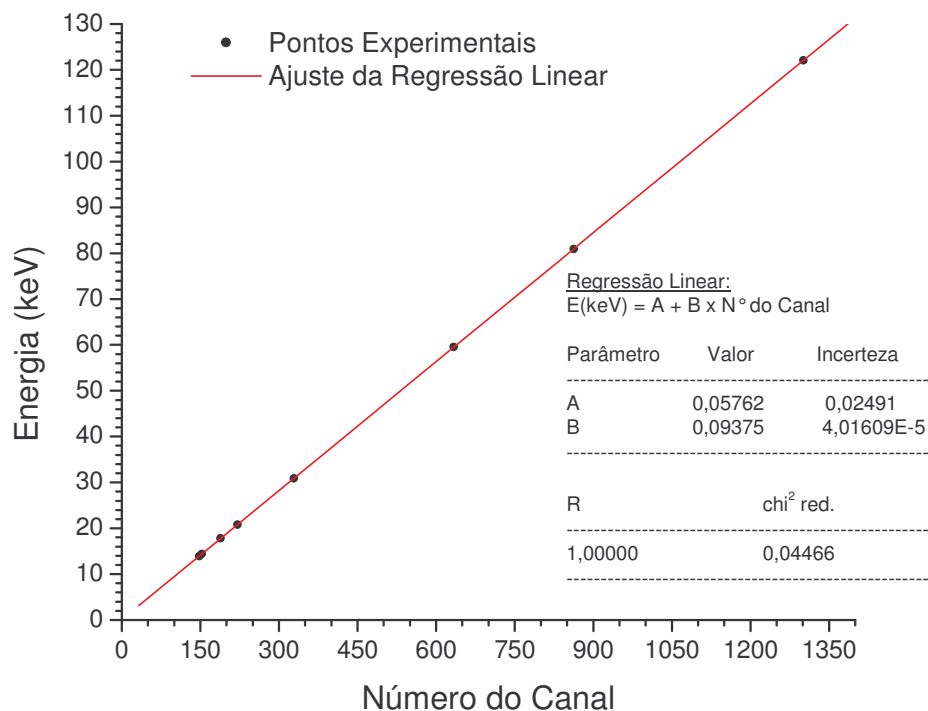
**Figura 49. Centróide do pico referente à energia de 20,8 keV do amerício-241.**

Esta mesma análise foi realizada para todos os picos indicados nos espectros. Os valores mostrados na Tabela 18 indicam os resultados alcançados para cada pico de energia em relação ao seu canal de contagem.

**Tabela 18. Relação entre a energia dos fótons coletados por canal de aquisição de dados.**

Isótopo	Energia (keV)	Número do Canal
amerício-241	13,9	148,0
	17,8	188,7
	20,8	221,3
	59,5412	633,9
bário-133	30,85	328,8
	80,89	862,9
cobalto-57	14,4130	153,1
	122,0614	1301,2

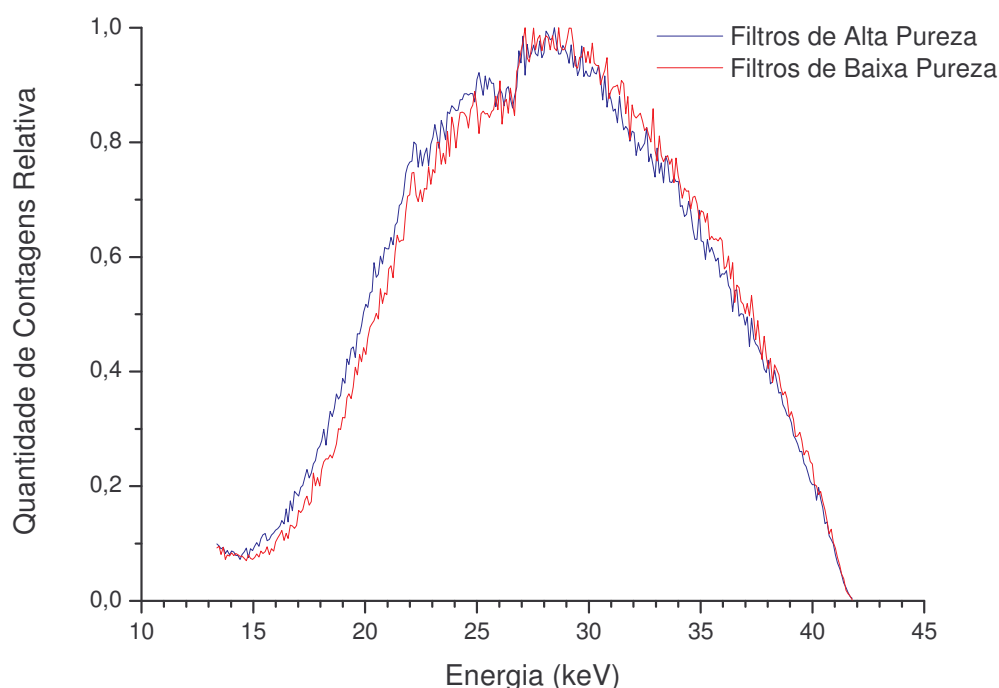
Através dos dados da Tabela 18 foi possível determinar a reta de calibração do sistema de espectrometria, mostrada na Figura 50, onde são indicados os picos de energia correspondentes ao seu respectivo canal de contagem.



**Figura 50. Reta de calibração para o detector CdTe XR100 Amptek ajustada por uma função linear.**

### 5.5.2. Detecção dos Espectros de Energia

Após a calibração do sistema, realizou-se a aquisição de dados para a detecção dos espectros das radiações de referência. A Figura 51 mostra a quantidade relativa de contagens para cada energia dos espectros gerados através da implantação da RQR2. O espectro em azul representa esta radiação de referência implantada através da adição de 2,04 mm Al de alta pureza no tubo de raios-x. O espectro em vermelho representa a RQR2 com a adição de 2,31 mm Al de baixa pureza na saída do feixe de raios-x.



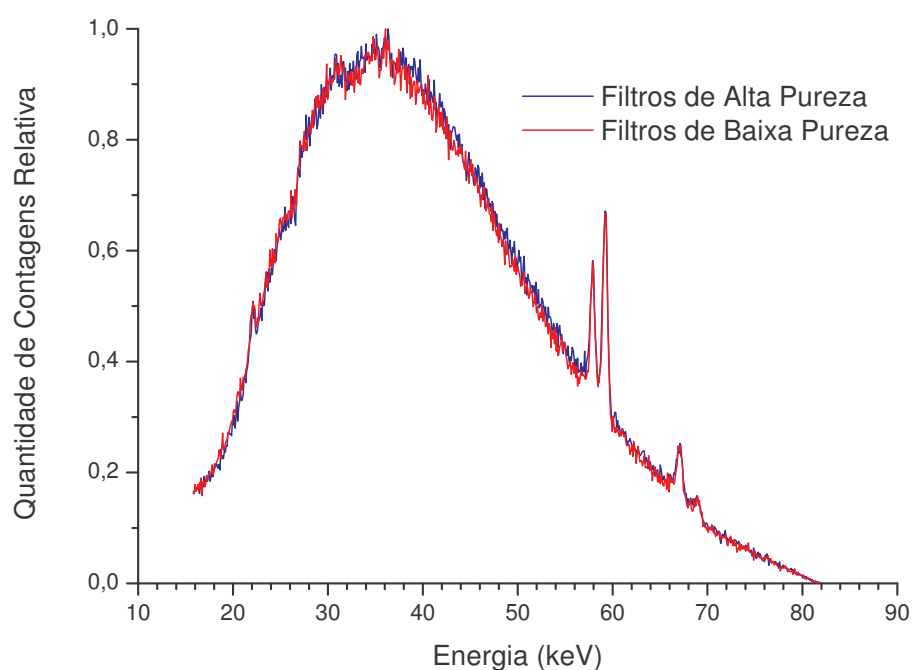
**Figura 51. Espectros da RQR 2 com filtros de alta e de baixa pureza.**

Os dados obtidos para a RQR2 mostram que a energia máxima dos dois espectros é a mesma, fato que já era esperado devido às características de formação dos raios-x. Também é um indicativo da estabilidade da tensão de pico do equipamento de raios-x, uma vez que a energia máxima dos fótons produzidos depende diretamente daquela.

É possível verificar que o espectro da RQR2 implantada com filtros de alta pureza (espectro azul) apresenta a intensidade de fótons de baixa energia maior e a intensidade de fótons de alta energia menor que a do espectro da mesma radiação

de referência implantada com filtros de baixa pureza (espectro vermelho), isto se deve às variações da espessura e composição química da filtração adicionada ao tubo de raios-x na saída do feixe.

A Figura 52 mostra a quantidade relativa de contagens para cada energia dos espectros gerados através da implantação da RQR6. O espectro em azul representa esta radiação de referência implantada através da adição de 3,00 mm Al de alta pureza na saída dos raios-x. O espectro em vermelho representa a RQR6 com a adição de 2,81 mm Al de baixa pureza na saída do feixe de raios-x.



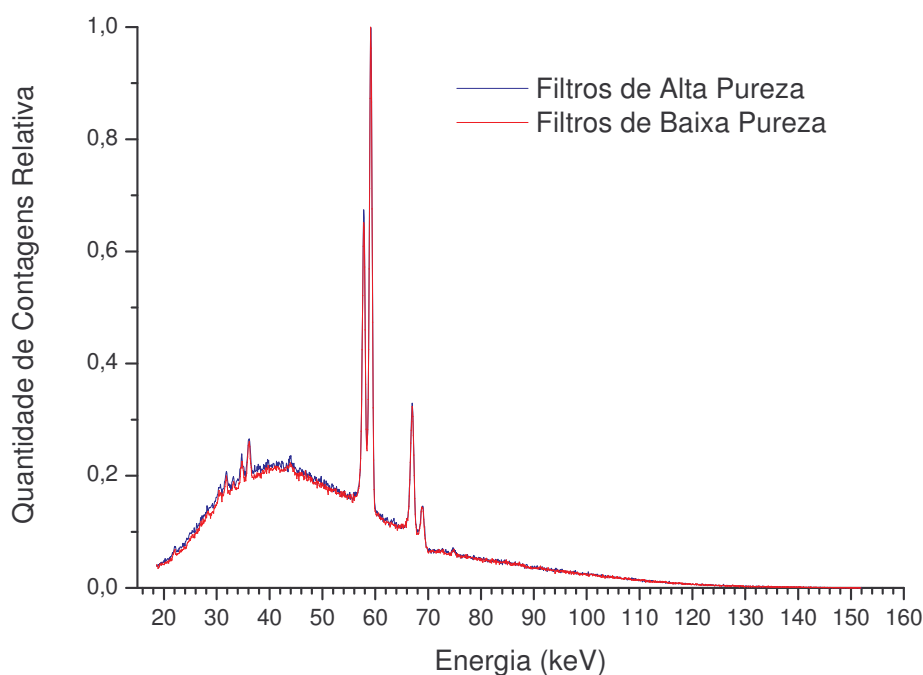
**Figura 52. Espectros da RQR 6 com filtros de alta e de baixa pureza.**

Os dados obtidos para a RQR6 mostram que a energia máxima dos dois espectros é a mesma, o que novamente é um bom indicativo da estabilidade da alta tensão do equipamento de raios-x nesta faixa.

Os dados adquiridos também mostram que já são pronunciados os raios-x característicos de 57, 59, 67 e 69 keV aproximadamente, provenientes de interações dos elétrons da corrente anódica com os elétrons da camada K do tungstênio.

Também é importante salientar que já não existem diferenças aparentes entre os dois espectros, o que pode demonstrar a viabilidade da implantação da radiação de referência RQR6 com a utilização de filtros de pureza inferior ao exigido pela norma, com base em um estudo mais aprofundado.

A Figura 53 mostra os espectros gerados à partir das radiações de referência RQR10, de 150 kV, com a adição de filtros de alta pureza de 3,95 mm Al (espectro azul) e adição de filtros de baixa pureza de 4,08 mm Al (espectro vermelho).



**Figura 53. Espectros da RQR 10 com filtros de alta e de baixa pureza.**

Com base nos dados obtidos para a RQR10 é possível observar neste espectro um pico em torno de 57 keV, que é proveniente de transições KL1 e KL2, também é possível observar imediatamente ao seu lado um pico em torno de 59 keV proveniente de transições KL3. Mais adiante é possível observar mais dois picos de energia característica, um em torno de 67 keV, proveniente de transições KM e outro pico em torno de 69 keV proveniente de transições KN (DESLATTES *et al.*, 2005).

Os picos de raios-x característicos são tão pronunciados em torno de 57 e 59 keV, que se torna de difícil identificação a energia máxima dos espectros sem uma análise mais apurada.

Novamente ressalta-se o fato de não existirem diferenças aparentes entre os dois espectros, o que pode demonstrar a viabilidade da implantação da radiação de referência RQR10 com a utilização de filtros de pureza inferior ao exigido pela norma, com base em um estudo mais aprofundado.

### 5.5.3. Verificação da Tensão de Pico

A Figura 54 mostra a parte de maior energia do espectro, utilizada para a aplicação da regressão linear de modo a calcular o parâmetro da tensão de pico para a RQR2 implantada utilizando-se filtros de alta pureza e a Figura 55 para filtros de baixa pureza:

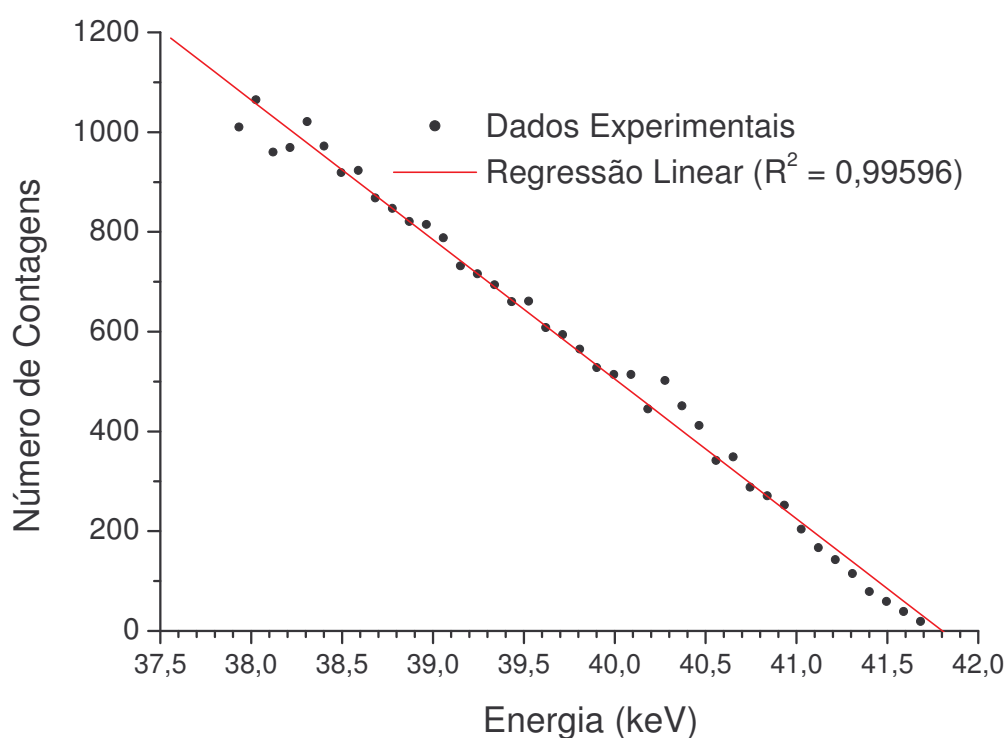
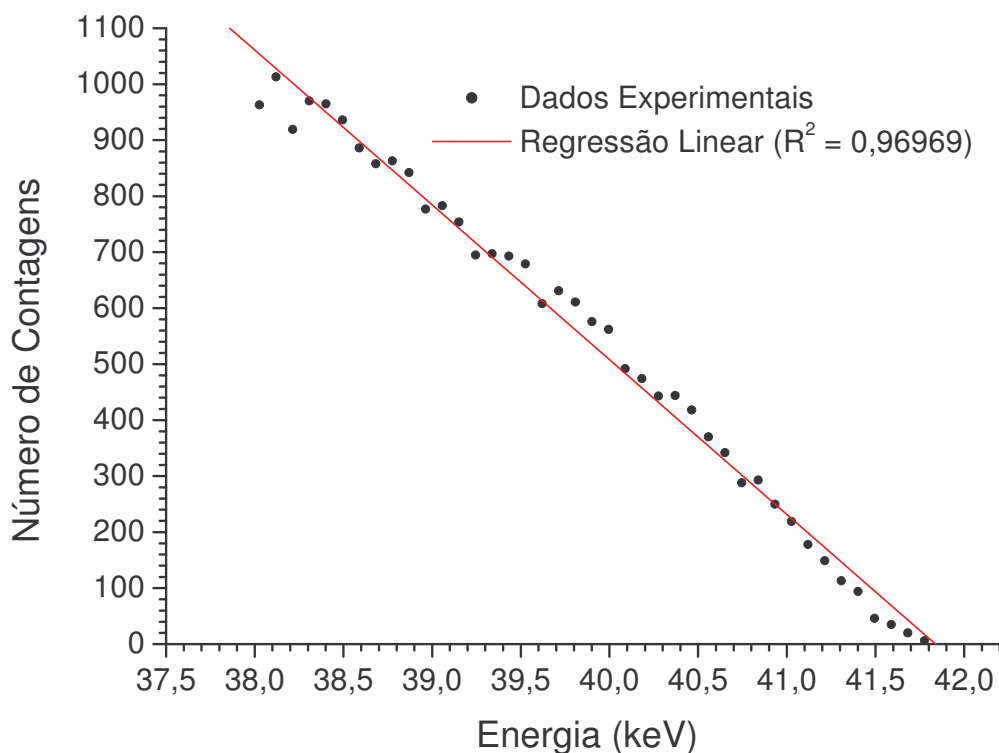


Figura 54. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR2 com filtros de alta pureza.



**Figura 55. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR2 com filtros de baixa pureza.**

O valor da tensão de pico calculado para a RQR2 com filtros de alta pureza foi de  $(41,80 \pm 1,20)$  kVp e com filtros de baixa pureza foi de  $(41,84 \pm 1,37)$  kVp, apresentando diferença de apenas 0,08 %. Este resultado é um bom indicativo de estabilidade do equipamento de raios-x em se tratando da reprodutibilidade da tensão de pico, mesmo que com um desvio em relação ao valor nominal de 4,55 %.

A partir da análise destes dados foi constatada a necessidade da repetição do procedimento de implantação das radiações de referência RQR2 com o valor de tensão nominal corrigido, de forma que seu valor medido seja de 40,0 kV. As incertezas calculadas encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela IEC.

A Figura 56 mostra a parte de maior energia do espectro, utilizada para a aplicação da regressão linear, de modo a calcular o parâmetro da tensão de pico para a RQR6 implantada utilizando-se filtros de alta pureza e a Figura 57 para filtros de baixa pureza:



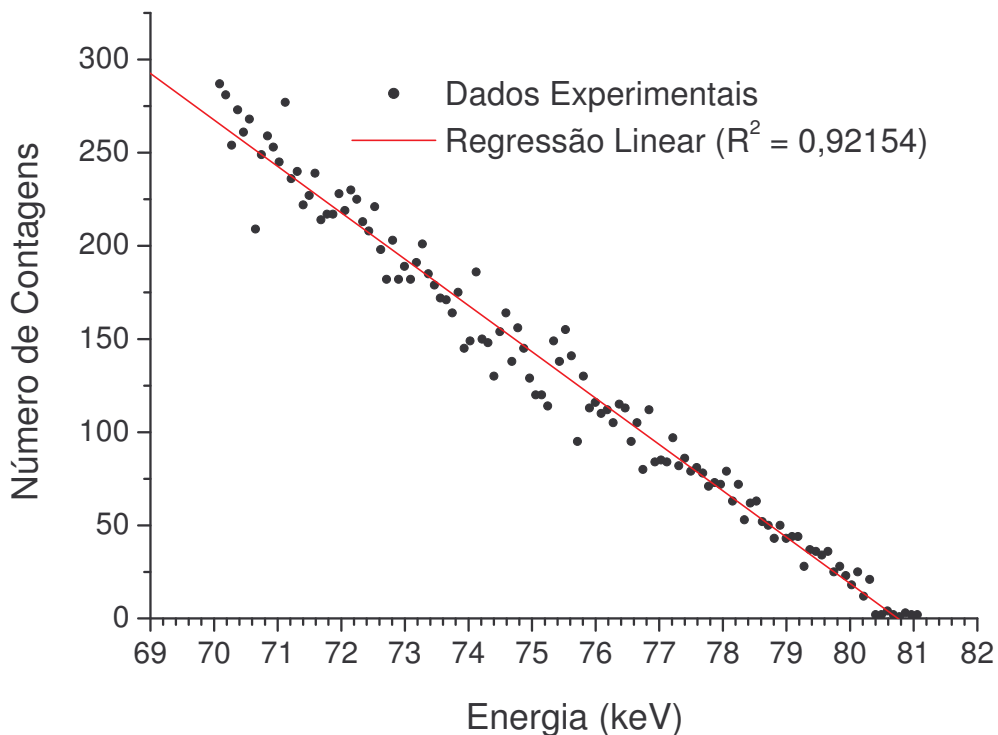


Figura 56. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR6 com filtros de alta pureza.

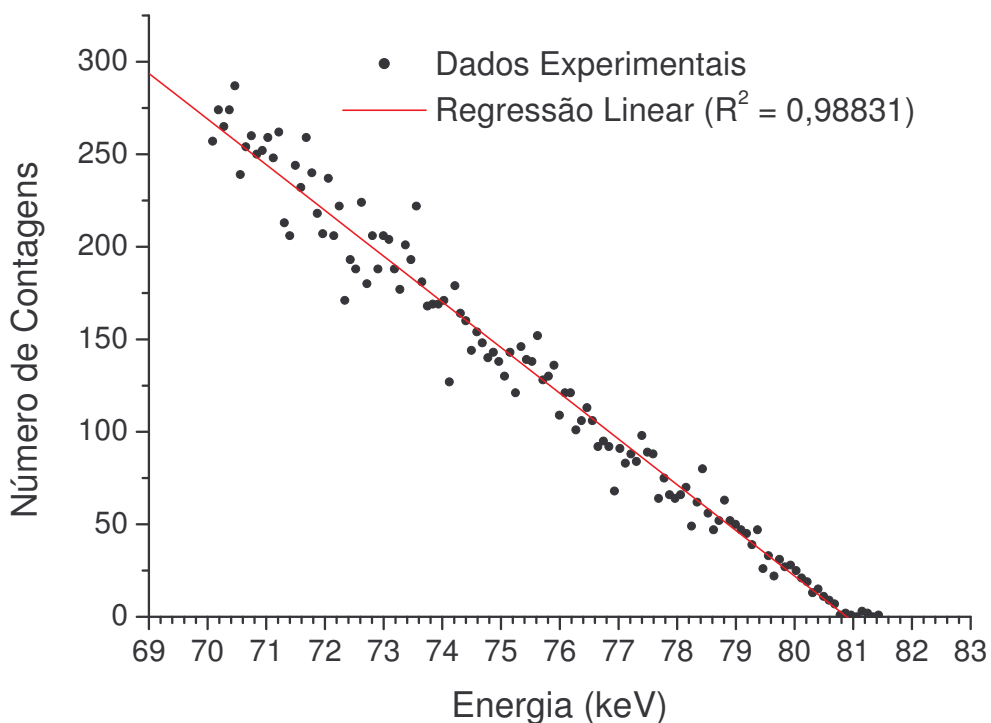


Figura 57. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR6 com filtros de baixa pureza.

O valor da tensão de pico calculado para a RQR6 com filtros de alta pureza foi de  $(80,75 \pm 2,15)$  kVp e com filtros de baixa pureza foi de  $(80,89 \pm 2,24)$  kVp,

apresentando diferença de apenas 0,17 %. Para este patamar de tensão o equipamento de raios-x também apresenta um bom indicativo de estabilidade e o desvio do valor nominal é de 1,03 %.

A partir da análise destes dados foi constatada a necessidade da repetição do procedimento de implantação das radiações de referência RQR6 com o valor de tensão nominal corrigido, de forma que seu valor medido seja de 80,0 kV. As incertezas calculadas encontram-se acima dos limites estabelecidos pela IEC, para um fator de abrangência  $k$  igual a 2; a adoção de um sistema de medição invasiva de tensão de pico pode ser uma forma de redução destes valores de incerteza.

A Figura 58 mostra a parte de maior energia do espectro, utilizada para a aplicação da regressão linear, de modo a calcular o parâmetro da tensão de pico para a RQR10 implantada utilizando-se de filtros de alta pureza e a Figura 59 para filtros de baixa pureza:

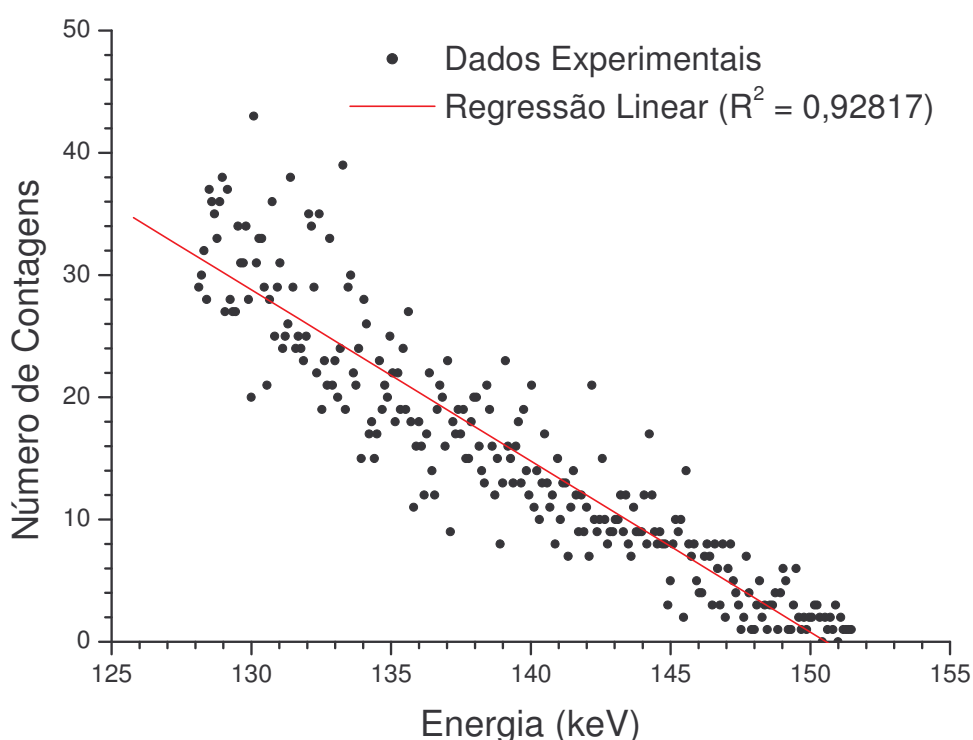
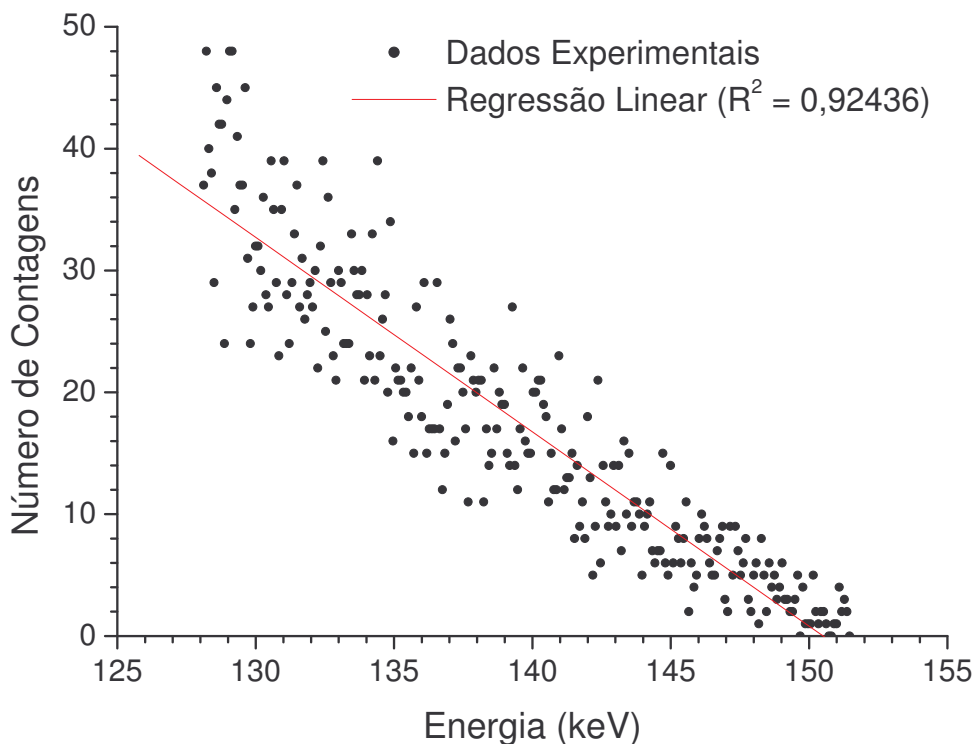


Figura 58. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR10 com filtros de alta pureza.



**Figura 59. Regressão linear da parte final do espectro de energia da RQR10 com filtros de baixa pureza.**

O valor da tensão de pico calculado para a RQR10 com filtros de alta pureza foi de  $(150,57 \pm 7,59)$  kVp e com filtros de baixa pureza foi de  $(150,51 \pm 7,82)$  kVp, apresentando diferença de apenas 0,04 %. Para este patamar de tensão o equipamento de raios-x também apresenta um bom indicativo de estabilidade e o desvio do valor nominal é de 0,36 %.

Apesar da análise destes dados permitir constatar que a tensão de pico se encontra muito próxima dos valores exigidos por norma, a incerteza associada às medições faz com que os dados estejam fora da faixa aceitável.

Na aquisição de dados para este espectro, a quantidade de contagens de maior energia foi muito baixa, fazendo com que a dispersão entre os dados seja muito grande na parte “final” do espectro, causando um aumento na incerteza e uma diminuição no r-quadrado ( $R^2$ ), caracterizando uma perda de confiabilidade metrológica. Portanto torna-se necessária uma aquisição de dados mais completa para uma diminuição da incerteza de medição do parâmetro tensão de pico, ou a adoção de um sistema de medição direta de tensão de pico.

## 5.6. Calibração da câmara de ionização 10X5-6

Este teste foi realizado conforme especificado no item 4.6. A Tabela 19 mostra os resultados da calibração da câmara Radcal Corporation 10X5-6 nos feixes de raios-x de referência RQR2, RQR6 e RQR10, com as tensões nominais utilizadas, pureza e quantidade de filtração adicionada e o valor da incerteza de cada coeficiente de calibração. A Tabela 19 mostra também uma comparação da resposta desta câmara em função das diferentes radiações de referência ( $k_{Q,Q_0}$ ).

**Tabela 19. Coeficientes de calibração da câmara 10X5-6 e incertezas associadas em função dos parâmetros característicos de cada radiação de referência.**

Radiação de Referência	Filtros Utilizados (Pureza)	Tensão Nominal (kV)	Filtração Adicionada (mm Al)	CSR (mm Al)	Coeficiente de Calibração - $N_k$ ( $\mu\text{Gy}/\mu\text{Gy}$ )	$k_{Q,Q_0}$	Incerteza (%)
RQR2	Alta	40	2,04	1,40	0,90	0,97	1,50
RQR2	Baixa		2,31	1,43		1,00	1,50
RQR6	Alta	80	3,00	3,02		1,00	1,49
RQR6	Baixa		2,81	3,00		0,99	1,50
RQR10	Alta	150	3,95	6,47		1,01	1,49
RQR10	Baixa		4,08	6,71		0,99	1,49

Por meio da análise dos dados da Tabela 19 é possível afirmar que a resposta da câmara de ionização 10X5-6 possui uma variação máxima de 3 % dentro da faixa especificada, o que é indicativo de baixa dependência energética na faixa diagnóstica, como previsto no manual (RADCAL, 1994).

As medidas dos coeficientes de calibração da câmara 10X5-6 vêm acompanhadas de suas incertezas expandidas com um fator de abrangência  $k$  igual 2, para um intervalo de confiança de 95,45 %; nestes cálculos de incerteza foram consideradas as piores condições. A Tabela 20 mostra como exemplo as fontes mais relevantes na medida da incerteza do coeficiente de calibração da RQR2 implantada com filtros de alta pureza; mostra também os tipos de incerteza com as distribuições de probabilidade, seus divisores e seus valores relativos.

**Tabela 20. Parâmetros relativos às incertezas para o coeficiente de calibração da câmara 10X5-6 irradiada na radiação de referência RQR2 com filtros de alta pureza.**

Fonte de Incerteza	Tipo de Incerteza	Distribuição da Probabilidade	Divisor	Incerteza Relativa (%)
Termômetro ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,020
Termômetro ( Calibração )	B	Retangular	2	0,051
Barômetro ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,004
Barômetro ( Calibração )	B	Retangular	2,53	0,023
Distância ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,115
Distância ( Posicionamento )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,577
Cronômetro ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,002
Câmara Padrão ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,001
Câmara Padrão ( Calibração )	B	Retangular	2	0,450
Câmara Padrão ( Desvio Padrão )	A	Normal	$\sqrt{10}$	0,025
Câmara Monitora ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,006
Câmara Monitora ( Desvio Padrão )	A	Normal	$\sqrt{10}$	0,047
Câmara 10X5-6 ( Resolução )	B	Retangular	$\sqrt{3}$	0,021
Câmara 10X5-6 ( Desvio Padrão )	A	Normal	$\sqrt{10}$	0,092
Valor da Incerteza Combinada		Normal		0,751
Valor da Incerteza Expandida		Normal (para k=2)		1,503

As fontes que mais contribuem para o valor da incerteza expandida são relativas à distância de posicionamento da câmara 10X5-6 em relação ao ponto focal do equipamento de raios-x e em relação à calibração da câmara RC6. Portanto, investimentos em um sistema de posicionamento mais exato causariam uma redução na incerteza expandida melhorando a confiabilidade metrológica do sistema de calibração neste aspecto.

Novamente, é possível observar a grande estabilidade do equipamento de raios-x e do sistema de medição através dos baixos valores de desvio padrão das leituras, tanto da câmara 10X5-6, como da câmara padrão de referência RC6, que foram menores que 0,8 %.

## 6. CONCLUSÕES

Investigou-se a metodologia e analisou-se os parâmetros das radiações de referência estabelecidas pela International Electrotechnical Commission (IEC) em raios-x diagnóstico, objetivando implantá-las em um equipamento de raios-x Pantak Seifert no Laboratório de Calibração de Dosímetros do CDTN.

O baixo valor encontrado para a filtração inerente do tubo de raios-x ( $0,17 \pm 0,04$ ) mm Al indicou a possibilidade da utilização do equipamento Pantak ISOVOLT HS 320 com radiações de referência de baixas energias recomendadas por normas aplicáveis.

Por meio do estudo do tamanho e da uniformidade do campo de radiação, sob diferentes condições de filtração, foi possível observar que o acréscimo de filtros ao equipamento gerou a uniformização do campo de radiação, aumentando a área útil deste em até três vezes. Também se observou a diminuição dos inconvenientes causados pelo efeito Heel e concluiu-se que, para a calibração simultânea de vários detectores no campo de radiação, é melhor que estes sejam posicionados perpendicularmente ao eixo catodo-anodo do tubo de raios-x. Os campos de radiação gerados com o foco grosso e fino ficaram muito similares em termos de intensidade relativa de radiação, sugerindo os mesmos parâmetros para ambos. Portanto, foi demonstrada a importância da realização de calibrações somente sob condições especiais e em campos com radiações de referência exigidos por normas.

Por meio da detecção dos espectros de energias das radiações de referência, pôde-se verificar suas similaridades quando implantadas com filtros de alta ou baixa pureza; isto sugeriu a viabilidade da implantação dos feixes de referência com a utilização de filtros com pureza de alumínio inferior (99,425 %) ao requisito da norma, que é muito restritivo (99,99 %). Verificou-se, também, a viabilidade da medida da tensão de pico do equipamento de raios-x através da medição da energia máxima dos espectros, ainda que a incerteza calculada neste tipo de medição indireta tenha sido alta.

Foi possível implantar as radiações de referência da IEC, identificadas como RQR2, RQR6 e RQR10, com filtros de alta e baixa pureza, respeitando-se os valores de 1ª camada semi-redutora e coeficiente de homogeneidade requeridos por norma dentro dos limites de tolerância, com seus respectivos valores de incerteza.

O sistema dosimétrico de referência, composto pela câmara de ionização e eletrômetro, apresentou-se estável ao longo do tempo e com desprezível corrente de fuga gerada por sinais espúrios e por radiação de fundo; isto aumentou a confiabilidade metrológica das medições realizadas.

Com este sistema dosimétrico, o procedimento de calibração de câmaras de ionização foi estabelecido com devida expressão das incertezas associadas.

As condições e procedimentos implantados tornam possível a caracterização de detectores de radiação utilizados na área de radiodiagnóstico. A avaliação metrológica dos parâmetros característicos das radiações de referência é uma ferramenta importante para justificar investimentos para melhoria do sistema de calibração.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGFA NDT PANTAK SEIFERT GMBH AGFA NDT PANTAK SEIFERT GMBH & CO. KG. Higly Stabilized Industrial X-Ray Equipment ISOVOLT 320: Operating Instructions. 2003.

ANKERHOLD U. Optimisation of a secondary standard chamber for the measurement of the ambient dose equivalent,  $H^*(10)$ , for low photon energies. Radiation Protection Dosimetry, v.118, n. 1, p. 16-21, 2005.

ALVARENGA, F. L; OLIVEIRA, P. M. C. de. Análise Metrológica de Testes de Constância em Aparelhos de Raios X Médico Convencional. 2005. 51 f. Monografia (Especialização em Proteção Radiológica com Ênfase em Raios-x Diagnóstico) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Fundação Mineira de Educação e Cultura, Belo Horizonte, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS IN MEDICINE. AAPM protocol for 40 – 300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology, 2001.

ANVISA. Portaria 453 do Ministério da Saúde: Diretrizes de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico Médico e Odontológico. Diário Oficial da União de 02 de junho de 1998.

ATTIX, F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2004, 607 p.

BAPTISTA NETO, A. T. Implantação de Radiações de Referência em uma Máquina de Raios-x Diagnóstico Médico para Fins de Calibração de Dosímetros Pessoais. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2005.



BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML, *Guia para a expressão de incerteza de medição*, 2 ed. brasileira do Guide to the expression of uncertainty in measurement, edição revisada, [s.n.], 1998.

BOCHUD F. O; GRECESCU M; VALLEY J. F. Calibration of ionization chambers in air kerma length, *Physics in Medicine and Biology*, v. 46, pp 2477-2487, 2001.

BUSHBERG, J. T.; SEIBERT, J. A.; LEIDHOLDT JR, E. M.; BOONE, J.M. *The essential physics of medical imaging*. Baltimore, IL.: Williams & Wilkins, 1994. 742 p.

BUSHONG, S. C.; *Radiologic science for technologists: physics, biology and protection*, St. Louis: Elsevier; Mosby, 2004, 638 p.

DESLATTES R. D.; KESSLER JR R. D.; INDELICATO P.; DE BILLY L.; LINDROTH E.; ANTON J.; COURSEY J. S.; SCHWAB D. J.; CHANG J.; SUKUMAR R.; OLSEN K.; DRAGOSET R. A.; X-ray Transition Energies Database, database version Sep. 2005, from URL <<http://www.physics.nist.gov/cgi-bin/XrayTrans>>, acesso em 17/08/2007.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. 23. ed. Rio de Janeiro: Elsevier / Campus, 1979. 928 p.

EVANS, R. D. *The Atomic Nucleus*. New York: McGraw-Hill, 1955. 972p.

FREITAS, M. B. de; *Panorama das Exposições Médicas em Radiologia Convencional no Estado de São Paulo*. 2005. 126 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2005.

GOETSCH, S. J; KAMANDE, J; ATTIX, F. H. A method for matching NBS x-ray beam qualities with a half- or full-wave rectified generator. *Medical Physics*, v.12, n.2, p. 249-251, 1985.

GREEN, S; PALETHORPE, J. E; PEACH, D. E; BRADLEY, D. A. Development of a calibration facility for test instrumentation in diagnostic radiology. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 67, n. 1, pp 41-46, 1996.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Certificado de calibração nº 0146/304. São Paulo, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Certificado de calibração nº TD 510001591. São Paulo, 2006.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA. Certificado de calibração nº LRD 003/2006. Rio de Janeiro, 2006.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. 3. ed. Brasília: SENAI/DN, 2007. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/infotec/vim.asp>>. Acesso em: 23 nov. 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. SI - Sistema Internacional de Unidades. 8 ed. Tradução da 7ª edição do original francês "Le systeme international d' unites": Rio de Janeiro. 2003. 116 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Calibration of radiation protection monitoring instruments.: Vienna: IAEA 2000. 153 p. (Safety reports series, 16).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice.: Vienna: IAEA 2007. 359 p. (Technical reports series, 457).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Radiation quantities and units*. Bethesda, MD: ICRU, 1980. (ICRU, 33).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 1267. IEC 61267:1994 Medical diagnostic X-ray equipment - Radiation conditions for use in determination of characteristics. Geneva, 1994.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61267: Medical diagnostic x-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics. Geneva, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61674: Medical electrical equipment – Dosimeters with ionization chambers and/or semi-conductor as used in x-ray diagnosis imaging. Brussels, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4037: X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy, Geneva, 1996-a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4037-1: Radiation characteristics and production methods. Geneva, 1996-b.

ISTITUTO NAZIONALE DI METROLOGIA DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI - INMRI. Report to the CCRI section i on the activity carried out at. ENEA-INMRI on photon and charged particle dosimetry in the. Period may 2001 - may 2003. Roma: INMRI, 2003. Disponível em: <<http://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>>. Acesso em: 15 Nov. 2007.

KNOLL, G. F. Radiation Detection and Measurement. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 802p.

KEITHLEY INSTRUMENTS. Model 6517A Electrometer User's Manual. Cleveland, Ohio, 2000-a, 341 p.

KEITHLEY INSTRUMENTS. Model 6517A Electrometer / High Resistance Meter Getting Started Manual. Cleveland, Ohio, 2000-b, 110 p.

KRMAR M.; SHUKLA S.; GANEZER K. Some Aspects Involving the use of CdTe for Finding End-point Energies in Diagnostic Radiology. *Applied Radiation and Isotopes*. Orlando, v. 64, n. 5, p. 584-587. Mai. 2006

LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA. Certificado de calibração nº LAPRE 0405/2000. Duque de Caxias, 2000.

LACERDA, M. A. S. Análise Crítica da Medida da Camada Semi-redutora em Radiologia Diagnóstica. 2002. 182 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

MAIA, A. F.; CALDAS, L. V. E. Determinação de camadas semi-redutoras em feixes de radiação x baseados na norma IEC 61267, *Revista Brasileira de Física Médica*. São Paulo, v. 1, n. 1, p. 9-14. Out. 2005

MIYAJIMA S.; IMAGAWA K.; MATSUMOTO M. CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy. *Medical Physics*, v. 29, n. 7, p. 1421-1429. Jul. 2002

NOGUEIRA M.S; Determinação dos fatores de conversão de kerma no ar e de fluência para o equivalente de dose ambiental para raios x gerados no intervalo de 50 kvp a 125 kvp. 1997. 118 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. 1997.

OLIVEIRA, P. M. C. de; SQUAIR, P. L.; NOGUEIRA, M. S.; BAPTISTA NETO, A. T.; PEREIRA, E. G.; DA SILVA T. A; On Implementing Reference Radiations for Calibrating and Testing Solid State Detectors for Dose Measurements in Radiology. In: 2007 International Conference on Solid State Dosimetry, Delft Technology University, Proceedings, Delft, 2007-a

OLIVEIRA, P. M. C. de; SQUAIR, P. L.; NOGUEIRA, M. S.; BAPTISTA NETO, A. T.; PEREIRA, E. G.; DA SILVA T. A; Analysis of Metrological Parameters of IEC X-Ray Reference Radiation Quality. In: 2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007 Santos. Proceedings, Santos: ABEN, 2007-b. 1 DVD-ROM

OLIVEIRA, P. M. C. de; SQUAIR, P. L.; NOGUEIRA, M. S.; DA SILVA T. A.; Uniformity and Field Size of Filtered X-Rays Beams. In: 2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007 Santos. Proceedings, Santos: ABEN, 2007-c. 1 DVD-ROM

PEREIRA, M. A. G.; Avaliação dos Espectros Primários e Secundários da Radiação X em Objetos Simuladores para Energias Utilizadas em Diagnóstico Médico. 2004. 299 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2004.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL - LABELO. Certificado de calibração nº F04808. Rio Grande do Sul, 2007.

POTIENS, M. da P. A.; CALDAS, L. V. E. Metodologia dosimétrica e sistema de referência para radiação x nível diagnóstico. 1999. 136 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 1999.

POTIENS, M. da P. A.; CALDAS, L. V. E. Espectrometria dos feixes de radiação de um sistema de radiodiagnóstico. In: REGIONAL CONGRESS ON RADIATION PROTECTION AND SAFETY, 5; IBERIAN AND LATIN AMERICAN CONGRESS ON RADIOLOGICAL PROTECTION SOCIETIES,2; REGIONAL IRPA CONGRESS, 2001, Recife. Proceedings. Recife: SBPR, 2001-a. 1 CD-ROM.

POTIENS, M. da P. A.; CALDAS, L. V. E. Calibration of kVp Meters Used in Quality Control Tests in Diagnostic Radiology by Spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, Oxford, v. 98. n. 3, p. 343-346, Nov. 2001-b.

PTW – Freiburg. Instruction Manual - Monitor Chambers Type 786, 7861, 7862, 7863, 34014. Freiburg, 1998, 14 p.

RADCAL CORPORATION. Chamber Images for Energy Dependence Charts and Schematic Drawings. Disponível em: <http://www.radcal.com> Acesso em: 18 jun. 2007.

RADCAL CORPORATION. Instruction manual for the model 9015 radiation monitor controller. Monrovia, 1994, 50 p.

RANNIKKO, S. The calibration of dosimetry instruments used in interventional radiology. Radiation Protection Dosimetry, v.94, n.1-2, pp. 151-153, 2001.

SCAFF, L.A.M. Bases Físicas da Radiologia, Diagnóstico e Terapia, SARVIER, São Paulo, 1979.

SILVA, T. A. da; PEREIRA, E. G.; ALONSO, T. C.; GUEDES, E. C.; GONÇALVES, E. C.; NOGUEIRA, A. A. Certificação de profissionais de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico em Minas Gerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 15-20., out. 2000, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABEN, 2000. 1 CD-ROM.

SOARES, C. M. A; Caracterização de um dosímetro para medida de dose pessoal. 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2001.

TAUHATA Luiz, SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R; DI PRINZIO, A. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Rio de Janeiro, RJ: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1999.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)