

Universidade do Estado do Rio de Janeiro Centro Biomédico Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Leonardo de Castro Pacífico

Caracterização das qualidades de radioproteção N10 a N150 no laboratório de metrologia do Departamento de Ciências Radiológicas LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ

> Rio de Janeiro 2020

Leonardo de Castro Pacífico

# Caracterização das qualidades de radioproteção N10 a N150 no laboratório de metrologia do Departamento de Ciências Radiológicas LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Física Médica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Radioterapia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Estrada Alves Coorientador: Prof. Dr. José Guilherme Pereira Peixoto

> Rio de Janeiro 2020

### CATALOGAÇÃO NA FONTE UERJ/REDE SIRIUS/CBA

P117 Pacífico, Leonardo de Castro. Caracterização das qualidades de radioproteção N10 a N150 no laboratório de metrologia do Departamento de Ciências Radiológicas LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ / Leonardo de Castro Pacífico. - 2020. 106 f.
Orientador: Carlos Frederico Estrada Alves Coorientador: José Guilherme Pereira Peixoto
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Programa de Pós-

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes. Programa de Pós-Graduação em Física Médica.

1. Radiação – Medidas de segurança – Teses. 2. Controle de segurança – Teses. 3. Radiação Ionizante. 4. Proteção Radiológica. I. Alves, Carlos Frederico Estrada. II. Peixoto, José Guilherme Pereira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes. IV. Título.

CDU 615.849

Bibliotecária: Angela da Silva Velho CRB7/4780

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Leonardo de Castro Pacífico

# Caracterização das qualidades de radioproteção N10 a N150 no laboratório de metrologia do Departamento de Ciências Radiológicas LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Física Médica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Radioterapia.

Aprovada em 17 de novembro de 2020.

Coorientador: Prof. Dr. José Guilherme Pereira Peixoto Comissão Nacional de Energia Nuclear

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Frederico Estrada Alves Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes - UERJ

Prof. Dr. Marcus Vinicius Teixeira Navarro Instituto Federal da Bahia

Prof. Dr. Luis Alexandre Gonçalves Magalhães Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes - UERJ

> Rio de Janeiro 2020

DEDICATÓRIA

À minha família.

## AGRADECIMENTO

Ao Departamento de Ciências Radiológicas (LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ) pelo apoio e espaço no desenvolvimento do presente trabalho.

À pesquisadora Prof <sup>a</sup> Dra. Josilene Cerqueira Santos, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pelo auxílio no manuseio do espectrômetro, correções espectrais e discussões.

Ao pesquisador Dr. Bruno de Melo Mendes, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) pelo auxílio nas correções espectrais.

## RESUMO

PACÍFICO, Leonardo de Castro. Caracterização das qualidades de radioproteção N10 a N150 no laboratório de metrologia do Departamento de Ciências Radiológicas LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ. 2020.106 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Física Médica) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

A caracterização no Laboratório de Metrologia do Departamento de Ciências Radiológicas (LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ) da série de espectros estreitos, ou série N, para fins de proteção radiológica como preconiza a norma ISO 4037-1:2015, foi objeto do presente trabalho. Foram caracterizadas 11 qualidades, N10 a N150. Foi utilizado um tubo de raios x industrial, um espectrômetro e uma câmara de ionização específica para radioproteção para aquisição das medidas. Foram calculados para cada qualidade: filtração inerente e fixa, energia média espectral, resolução espectral, camada semirredutora, kerma no ar e incertezas associadas, além da curva de dependência energética da câmara de ionização. Os resultados obtidos foram comparados com os valores de referência dados pela norma e com laboratórios nacionais, primários e secundários disponíveis na literatura. Todos os resultados foram satisfatórios quando comparados com os valores referenciais normativos, exceção da resolução espectral para a qualidade N150, que apresentou uma diferença 9 % acima do recomendado. A caracterização da série de espectros estreitos nas qualidades N10 a N150 foi estabelecida. Para que o LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ ofereça por completo o serviço de calibração à sociedade é necessário a rastreabilidade metrológica, obtida em um laboratório de referência, preferencialmente um nacional. Ressalta-se a importância das qualidades N ora caracterizadas pelo fato de serem a base para a caracterização de qualidades que permitam a calibração das grandezas operacionais comtempladas na terceira parte da norma ISO 4037: calibração de dosímetros de área e pessoal e medidas de suas respostas como função da energia e ângulo de incidência.

Palavras-chave: Qualidade de radioproteção. Radioproteção. Norma de radioprote-

ção.

## ABSTRACT

PACÍFICO, Leonardo de Castro. *Characterization of radioprotection qualities N10 to N150 in the metrology laboratory of the Department of Radiological Sciences LABMETRO/DCR/IBRAG/UERJ.* 2020. 106 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Física Médica) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

The characterization in the Metrology Laboratory of the Department of Radiological Sciences (LABMETRO / DCR / IBRAG / UERJ) of the series of narrow spectra. or series N, for the purpose of radiological protection as recommended by the ISO 4037-1:2015 standard, was the object of the present work. Eleven qualities were characterized, N10 to N150. An industrial x-ray tube, a spectrometer and a specific ionization chamber for radioprotection were used to acquire the measurements. For each quality, inherent and fixed filtration, average spectral energy, spectral resolution, halfvalue layer, kerma in the air and associated uncertainties were calculated for each quality, in addition to the energy dependency curve of the ionization chamber. The results obtained were compared with the reference values given by the standard and with national, primary and secondary laboratories available in the literature. All results were satisfactory when compared with the normative reference values, except for the spectral resolution for the N150 quality, which showed a difference 9% above the recommended. The characterization of the series of narrow spectra in qualities N10 to N150 has been established. In order for LABMETRO / DCR / IBRAG / UERJ to fully offer the calibration service to society, metrological traceability, obtained in a reference laboratory, preferably a national one, is necessary. We emphasize the importance of the gualities now characterized by the fact that they are the basis for the characterization of qualities that allow the calibration of the operational quantities contemplated in the third part of the ISO 4037 standard: calibration of area and personnel dosimeters and measurements of their responses as a function of energy and angle of incidence...

Palavras-chave: Radioprotection quality. Radioprotection. Radioprotection standards.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Visão geral dos componentes do tubo de raios x.	9
Figura 2 – Efeito Compton esquematizado2	1
Figura 3 - Efeito fotoelétrico esquematizado22	2
Figura 4- Predominância do efeito fotoelétrico e Comptom23	3
Figura 5 - Espectro contínuo gerado por raios x de freamento, ou bremsstrahlung24	1
Figura 6 - Espectro discreto, gerado por raios x característicos junto com o espectro	
contínuo2	5
Figura 7 - Stopping powers de colisão e stopping power radiativo27	7
Figura 8 - Comportamento da coleta de íons em função da tensão aplicada32	2
Figura 9 - Circuito eletrônico de uma câmara de ionização de placas paralelas3	3
Figura 10 - Esquema de medição da corrente elétrica por um	1
Figura 11 - Equilíbrio eletrônico em uma câmara de ionização	5
Figura 12 - Comportamento de um material semicondutor como uma câmara de	
ionização36	3
Figura 13 - Representação da definição de resolução energética ou espectral38	3
Figura 14 - Eficiência de detecção para o CdTe Observe a dependência com a	
energia39	9
Figura 15- Distribuição retangular4	5
Figura 16 - Distribuição triangular4	5
Figura 17- Distribuição normal47	7
Figura 18- Probabilidades típicas da distribuição normal47	7
Figura 19 - Arranjo experimental para aquisição das medidas via espectrometria57	7
Figura 20 - Arranjo experimental para aquisição das medidas de linha de base com a	3
câmara PTW 23361	3
Figura 21 - Eletrômetro painel de controle do tubo de raios x, e controle do	
disparador58	3
Figura 22 - Relação entre a filtração inerente e a CSR obtida experimentalmente59	9
Figura 23 - Valor da CSR em função da energia média calculada por interpolação,	
para o Al6 <sup>-</sup>	1
Figura 24 - Valor da CSR em função da energia média calculada por interpolação,	
para o Cu6 <sup>.</sup>	1

Figura 25 - Curva experimental para o cálculo da CSR para 60 kV, y=ln(k)	65
Figura 26 - Espectro da fonte de referência Am-241 para calibração do	
espectrômetro.	66
Figura 27 - Aquisição do espectro de referência N60. Dados brutos	67
Figura 28 - Espectro corrigido com energia média e resolução espectral para N60	). 67
Figura 29 - Largura a meia altura do espectro, representada pelo parâmetro dx na	а
planilha de cálculo	68
Figura 30 - Espectro para N10	68
Figura 31- Espectro para N15	69
Figura 32 - Espectro para N20	69
Figura 33 - Espectro para N25	70
Figura 34 - Espectro para N30	70
Figura 35 – Espectro para N40	71
Figura 36 - Espectro para N80	71
Figura 37- Espectro para N100	72
Figura 38 - Espectro para N120	72
Figura 39 - Espectro para N150	73
Figura 40 - Homogeneidade do campo de radiação	83
Figura 41 – Interpolação e extrapolação para obtenção das componentes de	
incerteza dos certificados	90
Figura 42 - Dependência energética da câmara de ionização de referência em	
relação à N60	93
Figura 43 - Predominância do efeito fotoelétrico e Compton em função do número	С
atômico e energia do fóton	97
Figure 44 -Região onde ocorrem os efeitos fotoelétricos e Compton na faixa de	
energia das qualidades caracterizadas	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de irradiação para a série dos espectros estreitos, série N54
Tabela 2 - Medidas para obtenção da filtração inerente.       65
Tabela 3 – Resultados e comparações das energias médias espectrais74
Tabela 4 - Resultados das resoluções espectrais, FWHM, e comparações com o
PNNL e a literatura75
Tabela 5 – Resultados das CSR e comparações com o PTB, NIST e literatura76
Tabela 6 - Medidas das grandezas obtidas por série estatística para N6077
Tabela 7 - Resultado das medições de kerma no ar para calcular a incerteza na
abertura no disparador81
Tabela 8 - Histórico das medições realizadas.
Tabela 9 - Resumo das incertezas para N60.89
Tabela 10 - Resultado das interpolações e extrapolações para as componentes de
incertezas de certificados90
Tabela 11 - Comparativo entra as incertezas expandidas com 2 laboratórios
primários, o laboratório nacional e um laboratório secundário
Tabela 12 - Resultado geral.    92
Tabela 13 - Valores de corrente e tempo para aquisição de kerma no ar para cada
qualidade N93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
СН	Coeficiente de homogeneidade
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSR	Camaran Semirredutora
DCR	Departamento de Ciências Radiológicas
FWHM	Full Width at Half Maximum
IAEA	International Atomic Energy Agency
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
NIST	National Institute of Standards and Technology NIST
PNLL	Pacific Northwest National Laboratory
РТВ	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

# SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	.14
1	BASES TEÓRICAS	.18
1.1	O tubo de raios X	.18
1.1.1	<u>Cátodo</u>	.19
1.1.2	<u>Ânodo</u>	.19
1.2	Produção de raios x	.20
1.2.1	Efeitos Compton e fotoelétrico	.20
1.2.2	Raios x de freamento, ou bremsstrahlung	.23
1.2.3	Raios x característicos	.25
1.2.4	Stopping power mássico	.26
1.2.5	Tipos de filtrações	.27
1.3	Qualidade do feixe de raios x	.28
1.3.1	Fluência de energia e energia média	.28
1.3.2	Camada semirredutora (CSR)	.29
1.3.3	Coeficiente de atenuação linear	.29
1.3.4	Coeficiente de homogeneidade	.30
1.4	Detectores, monitores e dosímetros de radiação	.31
1.4.1	Detectores de radiação a gás	.31
1.4.1.1	Câmara de ionização	.33
1.4.2	Detectores de estado sólido	.35
1.4.2.1	Junção p-n	.36
1.4.2.2	Eficiência do detector	.37
1.4.2.3	Resolução energética	.38
1.4.3	Espectrômetro	.38
1.5	Estatística	.40
1.5.1	Medidas de tendência central	.40
1.5.1.1	Média aritmética	.40
1.5.2	Medidas de dispersão	.41
1.5.2.1	Amplitude, desvio absoluto e desvio absoluto médio	.41
1.5.2.2	Variância	.42
1.5.2.3	Desvio padrão	.42

1.5.2.4	Desvio padrão da média	.43
1.6	Distribuições de probabilidades	.43
1.6.1	Distribuição retangular	.44
1.6.2	Distribuição triangular	.44
1.6.3	Distribuição normal	.45
1.7	Avaliação das incertezas da medição	.48
1.7.1	Incertezas tipo A e tipo B.	.49
1.7.2	Incertezas combinada, combinada relativa e expandida	.50
1.7.3	Graus de liberdade efetivo	.51
1.8	Norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015	.53
1.8.1	Caracterização do feixe por curva de atenuação	.55
1.8.2	Caracterização do feixe por espectrometria	.55
2	MATERIAIS E MÉTODOS	.56
2.1	Materiais	.56
2.2	Metodologia para caracterização dos feixes	.56
2.3	Metodologia para obtenção da filtração inerente do tubo de raios x	.59
2.4	Obtenção experimental dos espectros, energias médias e resolução	ões
	espectrais	.60
2.5	Obtenção das CSR	.60
2.6	Obtenção do kerma no ar	.61
2.7	Cálculo das incertezas	.64
3	RESULTADOS	.65
3.1	Filtração inerente e total	.65
3.2	Calibração do espectrômetro	.66
3.3	Espectros, energias médias e resoluções espectrais	.67
3.4	Valores interpolados das CSR	.75
3.5	Kerma no ar para N60	.76
3.6	Cálculo das componentes de incertezas para N60	.77
3.6.1	Carga elétrica	.77
3.6.2	Fator de correção para temperatura e pressão	.79
3.6.3	<u>Tempo</u>	.80
3.6.4	Corrente de fuga	.82
3.6.5	Homogeneidade do campo de radiação	.82
3.6.6	Corrente do tubo de raios x	.83

3.6.7	Tensão do tubo de raios x	83
3.6.8	Estabilidade da câmara de ionização	84
3.6.9	Espessura da filtração adicional	85
3.6.10	Posicionamento	85
3.6.11	Fator de recombinação iônica	86
3.7	Cálculo das incertezas expandida e combinada para N60	86
3.8	Cálculo das demais incertezas	88
3.9	Resultado geral	90
4	DISCUSSÃO	94
4.1	Limitação da câmara de ionização e incertezas entre N10 e N30.	98
	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	100
	ANEXO A - Tabela T-STUDENT	103
	ANEXO B - Certificado de calibração da câmara de ionização	104

## INTRODUÇÃO

A radioproteção, ou proteção radiológica, caracteriza-se pelas medidas tomadas a fim de reduzir nos seres humanos possíveis danos causados como consequência do uso de algum tipo de radiação ionizante de uma prática autorizada. (**Unsupported source type (ElectronicSource) for source CNE15.**). No Brasil, até abril de 2020, havia em uso 11.893 equipamentos de raios x de 100 mA a 500 mA; 4.883 tomógrafos; 1.665 raios x com fluoroscopia; 878 aparelhos dedicados à hemodinâmica; 3.858 mamógrafos e 47.435 aparelhos odontológicos periapicais (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020). A título de exemplo, em agosto de 2005 havia 1.752 tomógrafos em uso; um aumento de 2,8 vezes em um período de 15 anos.

Até 2011, existiam no Brasil mais de 150.000 indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs), ou seja, monitorados obrigatoriamente. Desses, 66 % estavam na área de radiologia e respondiam por 72 % da dose coletiva ocupacional (**Unsupported source type (Misc) for source Cla.**). Em 2007, a dose efetiva mundial estimada *per capita* para IOEs era de 5 mSv, sendo que desse total, 0,63 mSv correspondiam às exposições médicas. No ano de1980, essas doses eram 2 mSv e 0,37 mSv, respectivamente (HOLMBERG, 2010).

Tanto o paciente, submetido a exposição médica, quanto o profissional, submetido à exposição ocupacional, necessitam de ações que minimizem possíveis danos ocasionados pela radiação ionizantes. Tais ações dependem, crucialmente, de valores medidos por detectores de radiação, que servirão como base para elaborar estratégias visando sempre atender ao princípio da otimização em radioproteção.

A exposição ocupacional pode ocorrer em diversos lugares, tais como indústrias, instituições médicas, estabelecimentos de pesquisas, universidades, usinas nucleares etc. Uma proteção radiológica adequada para os trabalhadores torna-se fundamental para se justificar o uso das radiações ionizantes (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2000a)

Por exemplo, calibrar em Cs-137 um monitor que será usado para levantamento radiométrico em uma clínica de radiologia não é uma boa ação de proteção radiológica, embora seja uma prática corriqueira e errônea calibrar monitores de radiação em faixas de energias fora daquelas usadas na rotina.

Com o intuito de padronizar feixes de raios x que contemplem as várias faixas de energias utilizadas na rotina clínica, a norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015 oferece

um conjunto de feixes de raios x a serem caracterizados por laboratórios que desejam oferecer o serviço de calibração em qualidades específicas para radioproteção. É recomendado pela norma o uso dos espectros estreitos, ou N, aqueles com baixa resolução espectral, de forma a se ter uma melhor resposta do detector.

Destaca-se que desde o ano 2000, a *International Atomic Energy Agency* (IAEA), através da publicação *Safety Report Series* (SRS) de número 16, recomenda a calibração dos monitores de área e pessoal através da caracterização dos feixes contemplados pela norma ABNT NBR 5ISO 4037-1:201, de 1996. Ela entrou em vigor no Brasil em 2015, após tradução para o português pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Obviamente, a rastreabilidade metrológica é fundamental, já que o "resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição." (INMETRO, 2012a, p. 28). Logo, a caraterização tem que ser seguida de uma rastreabilidade metrológica, dada preferencialmente por laboratório designado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMNRI) ou pela International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

Importante destacar que os fabricantes já vêm referenciando a dependência energética de seus novos monitores, principalmente os de estados sólidos, às qualidades N da norma ISO 4037-1:2015.

#### Justificativa e relevância científica

Dada a relevância da proteção radiológica em um cenário de aumento contínuo de exposições ocupacionais e médicas e a prática inconsistente de calibração de monitores de proteção radiológica em condições divergentes daquelas nas quais esses monitores serão utilizados, é de interesse institucional para o Departamento de Ciências Radiológicas, pertencente a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DCR/UERJ), através de seu laboratório LABMETRO a caracterização das qualidades N oferecidas pela norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015. A caracterização destas qualidades possibilitará o oferecimento de um serviço de calibração de qualidade que atenda aos anseios da sociedade nas faixas energéticas de uso na rotina clínica, no âmbito da radiologia. A relevância cientifica está no fato de se entregar ao cliente um certificado de calibração com rastreabilidade metrológica e incertezas associadas ao processo de calibração que endossem o nível de confiança no resultado fornecido, uma vez que tais valores serão cruciais em estudos desenvolvidos por terceiros e pelo próprio LABMETRO/DCR/UERJ ao elaborar estratégias de mitigação de riscos e otimização concernente à radioproteção.

## Objetivo da dissertação

O objetivo do presente trabalho é apresentar a caracterização dos feixes de referência preconizados pela norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015, série N, espectros estreitos, para fins de calibração de detectores em radioproteção realizada no LABMETRO/DCR/UERJ.

#### Organização da dissertação

O presente trabalho contempla 4 capítulos, a saber: introdução, bases teóricas, materiais e métodos, resultados, análise dos resultados.

Nesta breve introdução é apresentada a importância da monitoração para fins de exposição ocupacional e médica, bem como a credibilidade dos resultados apresentados pelos monitores desde que sejam calibrados corretamente por qualidades dadas em norma e com rastreabilidade metrológica. Estão presentes também a justificativa e relevância científica do presente trabalho.

Em bases teóricas, é apresentado o arcabouço técnico utilizado no desenvolvimento e nos resultados da caracterização da série N, além da apresentação das partes da norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015.

Em materiais e métodos, a descrição dos equipamentos, acessórios e procedimentos utilizados na aquisição dos espectros e cargas elétricas é feita.

Em resultados são apresentadas as medidas das filtrações inerentes e adicional, energias médias espectrais, resoluções espectrais, camadas semirredutoras, kerma no ar para as qualidades N e incertezas associadas.

Em análise dos resultados são discutidos os valores das grandezas necessárias para a caracterização das qualidades N encontradas no presente trabalho em relação àqueles disponíveis através de publicações e divulgados por laboratórios de referência, bem como a importância de se manter a cadeia metrológica.

Em conclusão está uma síntese dos resultados alcançados e dos principais pontos analisados. São também elencados os novos desafios a serem vencidos.

## 1 BASES TEÓRICAS

Visando obter as qualidades de radioproteção desejadas, são necessárias sustentações teóricas que guiem a prática metrológica, de forma a confrontar o valor esperado com aquele mensurado. A base para que toda condição de medição ocorra, é o tubo raios x, que deve gerar um feixe contínuo o mais homogêneo possível, e o detector de radiação, que deve possuir uma dependência energética adequado às faixas de energias empregadas.

De forma a padronizar todo o aparato experimental, desde a configuração geométrica até as especificações técnicas dos equipamentos envolvidos nas condições de irradiações, será empregado o que preconiza a norma NBR ISO 40371-1:2015, que trata da caracterização da radiação x e gama de referência para calibração de dosímetros e medidores de taxa de dose e determinação da resposta em função da energia do fóton em sua parte 1: Características da radiação e métodos de produção (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015).

## 1.1 O tubo de raios X

Um dispositivo que contém uma fonte de elétrons, um caminho a vácuo para elétrons acelerados, um alvo para os elétrons colidirem e uma fonte externa de tensão, é chamado de tubo de raios x.

O tubo de raios x gera um ambiente para a produção de raios x de espalhamentos e característicos. Os componentes principais de um tubo de raios são: cátodo, ânodo, rotor, inserto do tubo, janela e cabeçote (BUSHBERG, 2012). A Figura 1 mostra uma visão geral do tubo de raios x.



Figura 1- Visão geral dos componentes do tubo de raios x.

Fonte: BUSHBERG, 2012.

## 1.1.1 <u>Cátodo</u>

O cátodo é a parte negativa do tubo, e consiste em um filamento e uma capa focalizadora. O material do filamento é constituído de tungstênio e tem um formato helicoidal. Está submetido a uma tensão de aproximadamente 10 V e a uma corrente de até 7 A. A corrente do tubo de raio x é expressa em mA, sendo 1 mA igual a  $6,24x10^{24} \ e/s$  (BUSHBERG, 2012). À medida que a corrente elétrica aumenta, o filamento aquece, e elétrons são liberados termionicamente. O número de elétrons emitido pelo cátodo é determinado pela temperatura do filamento; um fenômeno chamado efeito de carga espacial (BUSHBERG, 2012).

Os elétrons no espaço de carga têm que estar sob uma tensão da ordem de quilo volts entre o catodo e o ânodo para que exista uma correte elétrica no tubo. Para não haver repulsão entre os elétrons ao serem acelerados em direção ao ânodo, o filamento é mantido dentro de um dispositivo chamado capa focalizadora. À capa focalizadora é aplicado um potencial elétrico negativo, contrapondo-se a tendência natura de repulsão entre os elétrons, de forma a manter a corrente elétrica em linha reta e atingir o alvo no local correto (BUSHONG, 2017).

## 1.1.2 <u>Ânodo</u>

O ânodo é a parte positiva do tubo. O Tungstênio, símbolo W e número atômico Z = 74 é o elemento mais utilizado. Uma liga entre W e o elemento Rênio, símbolo Re

e número Z = 75, proporciona maior resistência à danos na superfície devido ao impacto da corrente elétrica ao longo do tempo (BUSHBERG, 2012).

Para (BUSHONG, 2017), a maioria dos ânodos dos tubos de raios x são giratórios, pois permitem a produção uma alta intensidade de raios x em milésimos de segundos. O ânodo tem que possuir uma alta capacidade de dissipação de calor, já que aproximadamente 99 % da energia produzida pela colisão com a corrente elétrica é térmica. O W possui um ponto de fusão de 3400 °C e uma condutividade térmica próxima à do cobre.

Uma outra característica importante do ânodo é seu ângulo. Definido como o ângulo entre a superfície do alvo em relação ao feixe central do feixe de raios x produzido. Esse ângulo varia entre 7º a 20º nos tubos de para radiodiagnósticos, e tem efeito sobre: o tamanho do ponto focal, a intensidade de saída do feixe de raios x e o campo de cobertura do feixe (BUSHBERG, 2012).

## 1.2 Produção de raios x

Ao perderem energia cinética nas colisões com o ânodo, os elétrons sofrem bruscas desacelerações. A diferença entre a energia final após a desaceleração e a inicial geram os raios x de freamento, ou *bremsstrahlung*. Outa forma de produção que ocorre concomitantemente são os raios x característicos, originados do efeito fo-toelétrico e que são característicos dos elementos, já que são dependentes da energia de ligação do elétron ao núcleo atômico.

#### 1.2.1 Efeitos Compton e fotoelétrico

Na faixa energética dos raios x utilizados na clínica para fins de diagnóstico e radioproteção, dois efeitos têm importância significativa na produção dos raios x: o efeito Compton e o efeito fotoelétrico.

O efeito Compton dá-se quando um fóton interage com um elétron considerado livre e estacionário, geralmente ocupando as camadas mais externas do átomo. Parte da energia desse fóton é transferida para o elétron, e a energia remanescente fica com o fóton agora espalhado (SIMON R. CHERRY, 2012).

O efeito Compton pode ser entendido em termos de sua cinemática e seção de choque. A primeira diz respeito às energias e ângulos envolvidos, enquanto a segunda

diz espeito à probabilidade do efeito acontecer (ATTIX, 2004). As equações 1, 2 e 3 apresentam os parâmetros cinemáticos; a equação 4 apresenta a seção de choque: A Figura 2 exemplifica o processo do efeito Compton.

$$hv' = \frac{hv}{1 + \left(\frac{hv}{m_0 c^2}\right) \cdot (1 - \cos\varphi)} \tag{1}$$

$$T = hv - hv' \tag{2}$$

$$\cot\theta = \left(1 + \frac{hv}{m_0 c^2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \tag{3}$$

$$\sigma_e = 6,665.\,10^{-25}\,\frac{cm^2}{el\acute{tron}}\tag{4}$$





Legenda:

hv - energia do fóton incidente; hv' - energia do fóton espalhado; T – energia cinética do elétron espalhado;  $\theta$  – ângulo de espalhamento do elétron em relação ao fóton incidente;  $\varphi$  – ângulo de espalhamento do fóton espalhado em relação ao fóton incidente; mom – momento do fóton ou elétron.

Fonte: ATTIX, 2004.

A seção de choque  $\sigma_e$  pode ser entendida como a probabilidade do efeito Compton acontecer quando um único fóton atravessa uma fina camada contendo 1 elétron por cm<sup>2</sup>, estendendo-se tal conceito para um feixe de radiação ao atravessar a mesma camada A seção de choque por átomo é dada pela equação 5, mostrando que a probabilidade de ocorrência do efeito Compton é proporcional ao número atômico e independente da energia até 0,1 MeV (ATTIX, 2004):

$$\sigma_a = Z. \sigma_e \tag{5}$$

Tal como no efeito Compton, o efeito fotoelétrico também pode ser entendido em função de sua cinemática e seção de choque.

No efeito Compton um fóton transfere parcialmente sua energia a um elétron, já no efeito fotoelétrico ele transfere toda sua energia para elétrons preferencialmente ocupando níveis energéticos K de átomo com alto número atômico Z (ATTIX, 2004).

Ao absorver toda energia do fóton, o elétron é ejetado de seu nível energético com uma determinada energia cinética. A Figura 3 apresenta esquematicamente o efeito fotoelétrico.





Legenda:

hv - energia do fóton incidente; T – energia cinética do elétron espalhado;  $\theta$  – ângulo de espalhamento do elétron em relação ao fóton incidente;  $\varphi$  – ângulo de espalhamento do átomo em relação ao fóton incidente;  $T_a$  – Energia cinética do átomo espalhado; mom – momento do fóton, elétron ou átomo espalhado. Fonte: ATTIX, 2004.

O elétron só será ejetado caso a energia do fóton incidente seja maior do que a energia  $E_b$  a qual está ligado ao núcleo, chamada energia de ligação. A equação 6 resume a cinemática do efeito fotoelétrico:

$$T = hv - E_b - T_a = hv - E_b \tag{6}$$

A energia de recuo do núcleo  $T_a$  é desprezível. Quanto menor hv, maior a probabilidade do efeito fotoelétrico ocorrer (ATTIX, 2004).

A seção de choque para o efeito fotoelétrico por átomo para energias abaixo de 0,1 MeV é dada pela equação 7:

$$\sigma_a = \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \tag{7}$$

Percebe-se que a probabilidade de ocorrência aumenta com a quarta potência do número atômico, em contrapartida do comportamento proporcional à Z do efeito Compton. Quanto menor a energia, maior a probabilidade de ocorrência do efeito fo-toelétrico; já para o efeito Compton independe da energia para a faixa em questão de 0,1 MeV.

A Figura 4 mostra a predominância dos efeitos fotoelétricos Compton, em função do número atômico e energia, respectivamente.





Fonte: OKUNO & YOSHIMURA, 2010.

## 1.2.2 Raios x de freamento, ou bremsstrahlung

Quando a corrente elétrica atinge o alvo, seus elétrons raramente se aproximam do núcleo, pois perdem significativa energia ao interagirem com o campo elétrico couloumbiano dos átomos do alvo, geralmente de W. Essa perda de energia resultará em um fóton de raios x, que poderá ter qualquer energia entre 0 eV e a máxima na qual foi acelerado, correspondendo à tensão máxima e dada em keV. São assim chamados de raios x de freamento, ou *bremsstrahlung*, justamente por serem dependentes da desaceleração (OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

Materiais com altos números atômicos produzem mais radiação de espalhamento, pois convertem uma fração maior das energias cinéticas dos elétrons em raios x de freamento; porém há perdas significativas na forma de energia térmica, motivo pelo qual elementos com alto ponto de fusão são preferidos. Para elétrons acelerados a 100 keV, apenas 1 % são convertidos em raios x, e 99 % predominantemente em energia térmica (ATTIX, 2004). A equação 8, conhecida como Lei de Hunt, apresenta a energia do fóton de raios x em função de seu comprimento de onda:

$$E_{final} - E_{inicial} = \Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$
(8)

onde *h* a constante de Planck, *c* a velocidade da luz e  $\lambda$  o comprimento de onda do fóton de raios x.

A frequência de ocorrências de determinados fótons com energia  $\Delta E$  gera o espectro contínuo, característico dessa forma de produção de raio x, como mostrado na Figura 5 para diferentes acelerações dos elétrons.



Figura 5 - Espectro contínuo gerado por raios x de freamento, ou *bremsstrahlung.* 

Fonte: OKUNO & YOSHIMURA, 2010.

#### 1.2.3 Raios x característicos

Os elétrons dos átomos do alvo podem ser ejetados de suas eletrosferas durante o processo de colisão dos fótons incidentes; preferencialmente aqueles das camadas mais internas, como a K. O buraco, ou vacância, que surge após a ejeção do elétron é ocupado por outro elétron de um nível superior à camada K, como por exemplo o nível L. Um fóton é gerado nessa transição com energia dada pela diferença entra as energias dos níveis (TAUHATA, SALATI, *et al.*, 2003).

Esse fóton é característico da distribuição eletrônica do elemento, daí o nome de raios x característico. Portanto, seu espectro é discreto. A energia do fóton característico  $E_{fc}$ , de forma generalizada, é dada pela equação 9:

$$E_{fc} = E_n - E_{n-1} = \frac{hc}{\lambda} , \qquad n > 1$$
(9)

onde  $E_n$  e  $E_{n-1}$  são as energias dos níveis superiores e inferiores, respectivamente.

Aproximadamente 1 % da energia cinética dos elétrons perdida durante as colisões com o alvo geram os raios x característicos (ATTIX, 2004). Pode-se ter ambos os espectros contínuos e discretos de um átomo, como exemplificado Figura 6 para alvos de tungstênio e molibdênio.





Fonte: OKUNO & YOSHIMURA, 2010.

## 1.2.4 <u>Stopping power mássico</u>

A taxa de perda de energia cinética T em um meio de número atômico Z por deslocamento x de uma partícula carregada é chamada de *stopping power*. Dividindo pela densidade  $\rho$  do meio no qual a partícula se desloca, surge o *stopping power* mássico, que por sua vez subdivide-se em *stopping power* de colisão e *stopping power* radiativo (ATTIX, 2004).

A equação 10 apresenta a composição dos stopping powers mássicos:

$$\frac{dT}{\rho x} = \left(\frac{dT}{\rho x}\right)_c + \left(\frac{dT}{\rho x}\right)_r \tag{10}$$

O subscrito *c* significa colisão e o subscrito *r* radioativo, respectivamente. O *stopping power* de colisão refere-se à fração de energia transferida a um átomo por uma partícula carregada quando essa passa pelo átomo a uma distância maior ou da ordem de seu o raio atômico. Essa energia predominantemente gera excitações no átomo e ionizações, além da produção de raios deltas (ATTIX, 2004).

O stopping power radiativo diz respeito ao quantitativo de radiação de freamento produzida à medida que a partícula carregada passa pelo átomo e perde energia cinética através de colisões com o campo coulombiano do mesmo. Nesse caso, as interações acontecem a uma distância da ordem do raio atômico. (ATTIX, 2004).

A produção de raios x de freamento y(T) pode ser dada como a razão entre o stopping power radiativo e o stopping power total (ATTIX, 2004), como mostrado na equação 11:

$$y(T) = \left(\frac{dT}{\rho x}\right)_r / \left(\frac{dT}{\rho x}\right)$$
(11)

A Figura 7 mostra o comportamentos dos *stopping powers* de colisão e dos *stopping powers* radiativos para o carbono, chumbo e cobre, em função da energia cinética dos elétrons.

Importante destacar que até 100 keV, o *stopping power* de colisão predomina para o carbono, Z=6; a partir de 1 MeV, o a radiação de freamento passa a ser significativa, como mostrado na (Figura 7).

Esse comportamento também refletirá a importância de se escolher materiais com altos valores de *stopping power* para sistemas de espectrometria, como o telureto de cádmio, CdTe, que será abordado mais adiante.





Fonte: ATTIX, 2004.

## 1.2.5 <u>Tipos de filtrações</u>

A filtração consiste na remoção de fótons de um feixe de raios x quando esses atravessam uma camada de um determinado material. São consideradas quatro tipos de flitrações: inerente, adicional, fixa e total.

A filtração inerente diz respeito às filtraçãos inerentes, próprias, da ampola que constitui o tubo de raios x, como a espessura do vidro que a constitui e o berílio na janela de saida dos raios x. A espessura do vidro varia entre 1 mm a 2 mm. O óleo que circunda a ampola também faz parte da filtração inerente (BUSHBERG, 2012).

A filtração fixa é a soma das filtrações inerentes mais qualquer adição de outro material, geralmente em milimetros de aluminio, de forma a atenuar os fótons de baixas energias oriundos do feixe da ampola.

A filtração adicional é aquela inserida após a filtração fixa com o objetivo de alterar o espectro do tubo de raios x, a energia média do feixe, como alumnio, cobre

e estanho, por exemplo. A soma das filtraçãos fixa e adicional constitui a filtração total (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015).

## 1.3 Qualidade do feixe de raios x

O feixe de raios x é predominantemente poli energético por ser produzido pelo freamento dos elétrons, embora possam existir raios x característicos, a depender da tensão aplicada ao tubo e da energia de ligação dos elétrons ao núcleo do átomo do material alvo. No entanto, é possível retirar desse feixe fótons de baixa energia, deixando-o mais energéticos. Esse processo é chamado de filtração, e um material atenuador, geralmente alumínio ou cobre, de espessura x é utilizado. Quando o feixe é filtrado, seu poder de penetrabilidade, ou dureza, aumenta. Consequentemente, sua energia média aumenta.

#### 1.3.1 Fluência de energia e energia média

Dado um campo de radiação com *N* fótons monoenergético *E*, atravessando uma área *A* de uma superfície, a fluência de energia  $\psi$  dessa campo, ou energia transportada por unidade de área (OKUNO e YOSHIMURA, 2010) será:

$$\psi = \frac{NE}{A} = \Phi E \tag{12}$$

Onde  $\Phi = N/A$  é a fluência, dada em  $cm^{-2}$ . Para fluências variáveis, a equação 12 fica:

$$\psi = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i E}{A} = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i E$$
(13)

A energia média do feixe pode ser escrita em termos da média ponderada  $\overline{E}$ , com as fluências  $\Phi_i$  comportando-se como fatores de peso:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Phi_i E}{\sum_{i=1}^{n} \Phi_i} \tag{14}$$

Para um feixe poli energético contínuo, a energia média é dada, segundo a norma ABNT NBR ISO 4037-1: 2015:

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E_{MAX}} \Phi_i E dE}{\int_0^{E_{MAX}} \Phi_i dE}$$
(15)

#### 1.3.2 Camada semirredutora (CSR)

O parâmetro que mede a dureza de um feixe é a camada semirredutora (CSR), que é a espessura de material que, colocado no feixe primário de raios x, i.e., aquele que sai diretamente do tubo, reduz pela metade sua intensidade inicial  $I_0$ . Essa espessura é chamada de primeira CSR. A espessura necessária para reduzir novamente o feixe a metade, ou um quarto do valor inicial, é chamada segunda CSR, e assim sucessivamente. Matematicamente essa progressão pode ser representada pela equação 16 (BUSHBERG, 2012).

$$I_n = \frac{I_0}{2^n} \tag{16}$$

Sendo *n* o número de CSR. Para n = 1, tem-se a primeira CSR.

O material do qual é feito a CSR reflete a probabilidade de absorver os fótons de raios x, traduzindo-se no coeficiente de atenuação linear  $\mu$ .

## 1.3.3 Coeficiente de atenuação linear

O coeficiente linear de atenuação  $\mu$  é dependente da energia do feixe de raios x, já que a probabilidade de interação com o material é dependente da energia. Para fótons, a atenuação é dada exponencial (ATTIX, 2004), conforme equação 17, para um feixe monoenergético:

$$I = I_0 e^{-(\mu . x)}$$
(17)

A intensidade *I* dependente da espessura x; quanto mais espesso, maior a remoção de fótons do feixe. Fazendo  $I = \frac{I_0}{2}$ , tem-se x = CSR. Resolvendo para  $\mu$ :

$$\mu = -\frac{ln\left(\frac{1}{2}\right)}{CSR} = \frac{0,693}{CSR} \tag{18}$$

O coeficiente linear de atenuação é um importante indicador do comportamento do feixe, explicitamente dependente da CSR e implicitamente dependente da energia do feixe de raios x, que por sua vez dependente da tensão aplicada ao tubo.

## 1.3.4 Coeficiente de homogeneidade

Quanto mais endurecido for um feixe, maior será sua energia média; pois os fótons de baixa energia são filtrados, ficando apenas os mais energéticos. Quanto maior for a filtração, maior o grau de homogeneidade do feixe. Um parâmetro que permite mensura essa homogeneidade, é coeficiente de homogeneidade (CH), definido como a razão entre a primeira CSR e a segunda CSR, como mostrado pela equação 19 (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015):

$$CH = \frac{CSR_{Primeira}}{CSR_{Segunda}}$$
(19)

Combinando a equação 19 com a equação 18, é possível expressar o CH em função do coeficiente de atenuação linear do material utilizado na determinação da CSR.

$$CH = \frac{CSR_{Primeira}}{CSR_{Segunda}} = \frac{\frac{0,693}{\mu_1}}{\frac{0,693}{\mu_2}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$
(20)

Para CH = 1,  $\mu_1 = \mu_2$  .Tem-se um feixe monoenergético, característicos das fontes radioativas.

## 1.4 Detectores, monitores e dosímetros de radiação

Um detector de radiação é um dispositivo que, quando na presença de um campo de radiação, é capaz de identificar sua presença e apresentar algumas características, tais como: repetitividade, reprodutibilidade, estabilidade, exatidão, precisão, sensibilidade e eficiência. Quando designado para um fim específico, como por exemplo mensurar o kerma no ar em condições de irradiação para mamografia ou radioproteção, tem-se o monitor de radiação (TAUHATA, SALATI, *et al.*, 2003). Essas condições de irradiação específicas geralmente são regidas por normas, como a ABNT NBR ISO 4037-1:2015 ou documentos internacionais, como o TRS 457: Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice.

Já um dosímetro é um dispositivo capaz de mensurar a dose absorvida depositada em seu volume sensível (ATTIX, 2004); é um detector e monitor. Um dosímetro também deverá apresentar (Salati, Prinzio, & Prinzio, 2003, p.185):

> Resultados em dose absorvida ou dose efetiva (ou taxa); Ser construído com material tecido-equivalente; Possuir fator de calibração bem estabelecido; Suas leituras e calibrações são rastreadas a um laboratório nacional e à rede do BIPM; Incertezas bem estabelecidas e adequadas para sua aplicação; Modelo adequado para cada aplicação; Modelo adequado para cada tipo e intensidade de feixe

## 1.4.1 Detectores de radiação a gás

Os detectores a gás se comportam como capacitores preenchidos com um gás com certa constante dielétrica (OKUNO e YOSHIMURA, 2010). Uma tensão é aplicada nos eletrodos desse capacitor, de forma a coletar os íons gerados quando esse capacitor é exposto a um campo de radiação. De acordo com a intensidade do campo elétrico, a forma como os íons são coletados difere (Figura 8).



Figura 8 - Comportamento da coleta de íons em função da tensão aplicada.

Para baixas tensões, até 100 V, os pares iônicos se recombinam com alta frequência, pois o campo elétrico não é suficiente para atrais os elétrons até o eletrodo de coleta, conforme região I. Valores de tensão entre 150 V a 400 V geram um platô, de forma que todos elétrons oriundos dos pares iônicos gerados são coletados pelo eletrodo. Essa é a chamada região de operação da câmara de ionização, pela região II. Aumentando a tensão até aproximadamente 650 V, surge a região III, chamada de região de proporcionalidade, pois surgem elétrons secundário proporcionalmente ao aumento da tensão. A região IV, por ser uma região de transição entre a região de proporcionalidade e a região de Geiger-Muller, não tem utilidade prática. A região V, chamada de região do Geiger-Muller, com tensão de até 1000 V, um único evento de ionização gera uma cascata de elétrons secundários. Um pulso de alta intensidade é gerado, pois quase todas as moléculas do gás são ionizadas, liberando uma grande quantidade de elétrons secundários. Para controlar a cascata de elétrons secundários, e permitir que o gás volte a condição inicial, é adicionado um agente de extinção, geralmente o gás argônio. Para tensões acima de 1200 V, ocorre a descarga contínua: um único evento de ionização gera uma cadeia de eventos similar àquela da região do Geiger-Muller, porém mesmo com a adição de um agente de extinção, a produção de elétrons secundários é constante, de forma a gerar uma descarga contínua entre os eletrodos. Essa é chamada região de descarga contínua, a região VI, e não há utilidade para fins de medição (BUSHONG, 2010)

Fonte: WUJEK, 1969, com adaptação do autor.

Os detectores de radiação a gás podem operar em diferentes regiões como mostrado na Figura 8, dependendo da combinação de alguns fatores, tais como tamanho do volume sensível, tipo de gás, pressurização do gás e nível da tensão aplicada (TSOULFANIDIS, 1995).

## 1.4.1.1 Câmara de ionização

A câmara de ionização é um dos detectores a gás mais antigos e amplamente usados, tendo seu princípio de funcionamento baseado na interação de partículas carregadas com um gás ou o ar. Nessa interação, cargas elétricas produzidas por ionização direta são coletadas sob a influência de um campo elétrico (Knoll, 2010). A Figura 9 apresenta um esquema simplificado de uma câmara de ionização de placas paralelas.



Figura 9 - Circuito eletrônico de uma câmara de ionização de placas paralelas.

Fonte: TSOULFANIDIS, 1995.

Quando um par de íon é formado a uma distância  $x_0$  das placas, com capacitância C, o elétron adquire energia cinética em função do campo elétrico aplicado entre as placas e é coletado pelo eletrodo de coleta, que está sob um potencial elétrico positivo; já o cátion, positivo, adquire energia cinética em sentido contrário e é coletado pelo eletrodo de guarda, que está sob um potencial elétrico negativo (TSOULFANIDIS, 1995)

Com a adição do resistor R, forma-se um circuito RC. O sinal de saída V(t) é dado pela equação 21:

$$V(t) = \frac{e \cdot x_0}{C \cdot d}$$
 21)

onde *e* é a carga do elétron. Uma demonstração detalhada é dada por Tsoulfanidis (1995, p.184). Há uma clara dependência com o local  $x_0$  de formação do ion dentro do volume sensível, dependência geométrica dada pela distancia *d* e dependência da capacitância dada por *C*.

A carga elétrica produzida e coleada pela câmara de ionização pode ser processada de dois modos: modo pulso e modo corrente.

No modo pulso, os sinais são tratados individualmente, e são dependentes de uma constante do sistema: o tempo morto, intervalo mínimo que o sistema consegue processar dois sinais distintos. (Knoll, 2010, p.121). Detectores como Geiger-Muller, cintiladores e espectrômetros são exemplos que operam no modo pulso.

Diferentemente do modo pulso, no modo corrente o sistema processa vários pulsos simultameamente, gerando assim uma média de pulsos em um intervalo de tempo; uma corrente elétrica. O eletrômetro é o dispositivo indicado para mensurar a corrente, e o faz atráves da queda de tensão no resistor R (TSOULFANIDIS, 1995). A Figura 10 exemplifica o que foi dito.





Fonte: TSOULFANIDIS, 1995.

Não é possível ter informações individuais dos pulsos nesse modo, o que dificulta a discriminação das energias dos fótons que interagem com o detector. Porém, há uma proporcionalidade entre o número de cargas elétricas coletadas e a energia depositada, o que permite calcular o kerma no ar (BUSHBERG, 2012).
A energia cinéticia inicial dos elétrons como resutado da interação com fótons por massa de ar é o kerma no ar, e a exposição é o número de cargas eléricas geradas por esses elétrons por massa do ar ao criarem ionizações.

O volume sensível de uma câmara de ionização muitas vezes é menor do que o deslocamento dos elétrons gerados nas ionizações, como mostrado na Figura 11 a esquerda, motivo pelo qual as paredes das câmaras de ionizações são feitas de materias com número atômico efetivo equivalente ao do ar dentro do volume sensiviel. (ATTIX, 2004). Dessa forma, o número de elétrons oriundos das interações com o material da parede da câmara de ionização entrando no volume sensível é igual ao número de elétrons saindo do volume sensível, culminando em uma condição chamada equilíbrio eletrônico, como mostrado na Figura 11, direita.





Fonte: TSOULFANIDIS, 1995.

Para atingir esse equilíbrio, que é uma função da energia incidente do feixe, para energias mais altas, na faixa do Cs-137 ou Co-60, são usadas capas, chamadas capas de *build up*, com materiais que permitam tal equilibrio (BUSHBERG, 2012).

# 1.4.2 Detectores de estado sólido

Os detectores de estado sólido são constituídos de materiais semicondutores, tais como silício, germânio, selênio etc. O que caracteriza a condutividade de um material é sua banda de energia proibida, situada entre a banda de valência e a banda de condução. Em materiais condutores, não há separação entre as bandas de valência e de condução; nos isolantes, há uma separação de aproximadamente 10 eV, e nos semicondutores, de 1 eV (TSOULFANIDIS, 1995).

O princípio de operação dos detectores semicondutores é semelhante aos das câmaras de ionização, porém os carreadores de carga não são elétrons e íons, e sim elétrons e buracos (TSOULFANIDIS, 1995). À esses materiais são adicionados impurezas, ou dopagem, de forma que os detectores ajam como diodos, i.e., permitem o fluxo de corrente elétrica apenas em uma direção quando submetidos a uma diferença de potencial (BUSHBERG, 2012),

# 1.4.2.1 Junção p-n

Quando o semicondutor é dopado com um elemento doador de elétrons, como o bóhrio, tem-se o tipo n; quando é dopado com um elemento formador de buracos, como o fósforo, tem-se o tipo p. Juntando ambos os tipos, tem-se a junção p-n. Se nenhuma tensão elétrica for aplicada a essa junção, poucas cargas positivas migrarão para o lado n; porém, quando uma tensão elétrica é aplicada de forma que o potencial positivo esteja do lado do tipo-p e o potencial negativo do lado do tipo-n, um fluxo de cargas elétricas surgirá. Invertendo a polaridade, não há fluxo. Surge então uma região de depleção, na qual cargas positivas e negativas estarão concentradas nas extremidades opostas. A Figura 12 apresenta esquematicamente o processo.





Fonte: BUSHBERG, 2012

Nessa condição de depleção, o detector semicondutor se assemelha a uma câmara de ionização, e quando fótons interagem com os elétrons, esses ganham

energia e atingem a banda de condução. Em seguida, são atraídos para a parte de buracos, ou cargas positivas, formando assim um par elétron- buraco. Momentaneamente, um pulso surge, já que o elétron será atraído para a polaridade positiva da tensão aplicada ao sistema. Detectores assim são operados no modo pulso (BUSHBERG, 2012).

#### 1.4.2.2 Eficiência do detector

A eficiência *E* de um detector diz respeito a sua capacidade em converter a radiação emitida por uma fonte em sinais úteis. Pode ser dada como um produto das eficiências geométricas e intrínsecas (SIMON R. CHERRY, 2012), como mostrado na equação 22:

$$E = g.\varepsilon \tag{22}$$

onde g é a eficiência geométrica, ou seja, a eficiência com que o detector intercepta a radiação proveniente da fonte e  $\varepsilon$  a eficiência intrínseca, radiações incidentes no volume sensível que são absorvidas e convertidas em sinais úteis.

Fatores como a área sensível do detector e sua distância à fonte são cruciais, como mostrado na equação 23:

$$g = \frac{A}{4\pi r^2} \tag{23}$$

Sendo A á área de sensibilidade do detector e r a distância à fonte.

Em relação à eficiência intrínseca  $\varepsilon$ , fatores como a espessura e composição do volume sensível, traduzidos pelo *stopping power* mássico, bem como o tipo de radiação incidentes são determinantes. A equação 24 apresenta a eficiência intrínseca:

$$\varepsilon = \frac{R_{int}}{R_{inc}} \tag{24}$$

Sendo  $R_{int}$  a fração da radiação incidente  $R_{inc}$  que são absorvidas, i.e., sofrem interações e são convertidas em sinais úteis. Substituindo as equações 24 e 23 em 22, pode-se reescrever a eficiência de um detector como:

$$E = \frac{A}{4\pi r^2} \cdot \frac{R_{int}}{R_{inc}}$$
(25)

#### 1.4.2.3 Resolução energética

Dado um espectro qualquer que apresente um fotopico *E*, sua resolução energética, ou resolução espectral, é definida como a largura total à meia altura  $\Delta E$ , ou do inglês *full width at half maximum* (FWHM), e expressa a capacidade de um sistema em diferenciar dois fótons de energias próximas (D.L. BAILEY, 2014). A equação 26 expressa a resolução energética de forma relativa, e a Figura 13 exemplifica o que foi dito:

$$RE(\%) = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 = \frac{x_2 - x_1}{E} \cdot 100$$
(26)





Fonte: STELLARNET, 2017.

# 1.4.3 Espectrômetro

Um espectrômetro é um sistema de detecção que permite obter informações da distribuição da energia de um feixe de radiação. A maioria dos espectrômetros são operados no modo pulso, sendo sua amplitude proporcional à energia depositada no detector através da interação que o gerou.(BUSHBERG, 2012). Dois requisitos fundamentais são necessários para um elemento ser utilizado como detector de um espectrômetro: o primeiro é apresentar uma alta probabilidade de interação da radiação x ou gama, de forma a maximizar a produção de efeito foto-elétrico; o segundo é ser capaz de detectar os fotoelétrons produzidos (KNOLL, 2010).

O composto telureto de cádmio, CdTe, além de permitir a operação do espectrômetro na temperatura ambiente, através do efeito Peltier, apresenta um alto número atômico Z, potencializando a produção do efeito fotoelétrico, como apresentado na equação 7, página 21, o que o torna um excelente detector de estado sólido para energias na faixa de 100 keV. A seção de choque para o efeito fotoelétrico diminui com o aumento da energia, sendo necessárias correções espectrais acima de aproximadamente 55 keV, como pode ser visto na Figura 14.

As principais correções espectrais para o composto TeCd são referentes às radiações características geradas nas camadas K do Cd e Te respectivamente, raios x Compton e eficiência do detector (GONZALES, 2016).

Uma discussão mais aprofundada englobando as correções espectrais no detector CdTe é feita por Tomal (2015), Carvalho (2008) e Correia, (2016).

Figura 14 - Eficiência de detecção para o CdTe Observe a dependência com a energia.



Fonte: AMPTEK, 2020.

# 1.5 Estatística

Todo processo de mensuração é realizado com o auxílio de um instrumento. A impossibilidade de realizar uma medição exata faz com que os resultados tragam consigo uma incerteza que se traduz na dispersão em relação a sua medida de tendência central, geralmente a média aritmética. Uma medida é então caracterizada pelo valor medido e a respectiva incerteza da medição. A qualidade de uma dada mensuração está diretamente relacionada a sua incerteza, e avaliar corretamente essa incerteza é de suma importância para a credibilidade dos resultados de medição (INMETRO, 2012).

Dadas as dúvidas existentes quanto a medição realizada, decorrente do fato da mesma não ser exata, para quantificar a incerteza são empregadas medidas de tendência central e medidas de dispersão, pertencentes a uma determinada distribuição de probabilidades de ocorrências dos eventos em estudo dentro de um nível de confiança.

#### 1.5.1 Medidas de tendência central

Quando uma única medição de um corpo, ou mensurando, é realizada, as informações inerentes ao processo de medição e mesmo fenomenológico no qual o mensurando está inserido não são considerados. Ao realizar um conjunto de medições no mensurando de forma a se ter um valor representativo do valor verdadeiro, ou seja, uma tendência a um valor central, as informações serão consideradas e analisadas através da dispersão em torno do valor verdadeiro (DANIEL e CROSS, 2013).

#### 1.5.1.1 Média aritmética

Por definição é a soma de valores dividido pelo número de valores, subdividindo-se em média amostral e média populacional. A primeira diz respeito a média de uma amostra aleatória de uma população; a segunda diz respeito a média de um parâmetro populacional, como por exemplo a idade de uma população (INMETRO, 2012a).

A média amostral  $\mu$ , doravante apenas média, é dada pela equação 27:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{27}$$

Onde N é o número de medições e x<sub>i</sub> o valor de cada medida. Quanto maior o número de valores, ou medições, mais próximo a média estará do valor verdadeiro do mensurando. Como todos os valores são utilizados no cálculo da média, intervalos com valores extremos exercem forte influência em seu valor (DANIEL e CROSS, 2013).

#### 1.5.2 <u>Medidas de dispersão</u>

A medida da dispersão é de fundamental importância, pois está diretamente relacionado a incerteza da medição. Segundo o Guia Para a Expressão de Incerteza de Medição (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, p.2), a incerteza de medição é um "parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando."

#### 1.5.2.1 Amplitude, desvio absoluto e desvio absoluto médio

Todo intervalo de dados possui uma amplitude *L*, dada pela diferença entre o maior e o menor valor do intervalo. A amplitude por si só é um parâmetro rudimentar que expressa a dispersão ao redor da média. O módulo da diferença entre a média  $\mu$  do intervalo de dados de amplitude L e cada medida  $x_i$  pertencente ao intervalo, é o desvio absoluto  $D_{abs}$ . Dividindo o desvio absoluto pelo número de medições, tem-se o desvio médio absoluto  $D_{médio abs}$ . As equações 28, 29 e 30 mostram a amplitude, desvio absoluto e desvio médio absoluto, respectivamente.

$$A = x_{m\acute{a}ximo} - x_{m\acute{n}imo} \tag{28}$$

onde  $x_{maximo}$  e  $x_{minimo}$  são os maiores e menores valores do intervalo, respectivamente.

$$D_{abs} = \sum_{i=1}^{n} |\mu - x_i|$$
(29)

Para *n* medições:  

$$D_{médio\ abs} = \frac{D_{abs}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\mu - x_i|}{n}$$
(30)

Em relação à amplitude *A*, o desvio médio absoluto  $D_{médio abs}$  é uma medida de dispersão mais robusta, pois é a média das distâncias à medida de tendência central  $\mu$ .

# 1.5.2.2 Variância

Elevando a equação 30 ao quadrado, tem-se uma medida de dispersão  $s^2$  chamada variância, dada pela equação 31:

$$s^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\mu - x_{i})^{2}}{n - 1}$$
(31)

O cálculo da variância diz respeito a uma amostra da população do intervalo de dados em questão. A variância de uma amostra não é computada exatamente como a variância de uma população; o denominador n - 1 se comporta como um fator de correção, de forma a tornar o cálculo da variância da amostra um estimador imparcial da população (KAZMIER, 2013).

A variância apresenta a dispersão na forma quadrática. Para se ter a forma linear, emprega-se o desvio padrão.

#### 1.5.2.3 Desvio padrão

O desvio padrão  $\sigma$  é usado em conjuntos de dados que possuem uma distribuição simétrica em relação a sua medida de tendência central, geralmente a média aritmética. O desvio padrão da amostra é dado pela equação 32, e é a raiz quadrada positiva da variância:

$$\sigma = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\mu - x_i)^2}{n - 1}}$$
(32)

Das medidas de dispersão, o desvio padrão é a mais utilizada, pois é característico das distribuições normais, as quais governam aproximadamente vários fenômenos da natureza.

1.5.2.4 Desvio padrão da média

Quando se tem o conhecimento do comportamento do sistema de medição utilizado, expresso pelo desvio padrão, uma medida de dispersão, utiliza-se o desvio padrão da média, dado pela equação 33 (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2007):

$$s(\bar{\mu}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma$$
(33)

onde n é o número de medições realizadas e  $\sigma$  é o desvio padrão.

#### 1.6 Distribuições de probabilidades

Dada medida pertencente ao conjunto de medidas é uma varável aleatória X, com determinadas chances de ocorrência.

Uma vez definida a variável aleatória, existe interesse no cálculo dos valores das probabilidades correspondentes. O conjunto das variáveis e das probabilidades correspondentes é denominado distribuição de probabilidades (Correa, 2003, p. 79).

Para cada valor assumido pela variável aleatória existe uma função P(X), chamada função de densidade de probabilidade, que expressa a probabilidade de ocorrência de X. Portanto, para cada valor  $x_i$  assumido por X, há uma probabilidade do evento  $A_i$  ocorrer. A equação 34 expressa matematicamente esta ideia:

$$P(X = x_i) = P(A_i) \tag{34}$$

Como exemplo, o fenômeno de jogar um dado não viciado e obter o número 3. Neste caso, X assume o valor 3 e a função densidade de probabilidade é 1/6. Usando a equação 34:

$$P(X=3) = P(face 3) = \frac{1}{6} \approx 0.17$$
(35)

Nesse exemplo, P(X) é uma constante, pois sempre haverá 1 chance em 6 de sair qualquer face do dado, e a distribuição de probabilidades será uniforme, independentemente do número assumido para X. A variável aleatória é discreta, já que a face de um dado é um número inteiro. Porém, rotineiramente há situações onde nossa variável aleatória não é discreta, e sim contínua, podendo ter qualquer valor compreendido na amplitude do intervalo esperado de medição. Muitos fenômenos nos quais a varável aleatória contínua predomina, surge um tipo particular de distribuição de probabilidades: a distribuição normal. Entretanto, para algumas situações tem-se distribuições do tipo retangular e triangular.

# 1.6.1 Distribuição retangular

Uma distribuição retangular é usada quando nenhum tipo de conhecimento do comportamento da função densidade de probabilidade P(X) para o intervalo de medidas é dado (VERONIKA R, 2007). Logo, supõe-se que X poderá receber de forma equiprovável qualquer valor dentro do intervalo (INMETRO, 2012a). A Figura 15 representa uma distribuição retangular.

A probabilidade de X assumir qualquer valor entre os extremos  $\mu - a \in \mu + a \in$ a mesma. A função densidade de probabilidade *P*(*X*) é dada pela equação 36. A amplitude do intervalo é 2*a*:

$$P(X) = \frac{1}{2a} \tag{36}$$

# 1.6.2 Distribuição triangular

A distribuição triangular é usada quando se tem uma alta probabilidade do valor estar no centro dos intervalo 2*a* e uma baixa probabilidade de estar nos extremos (VERONIKA R, 2007). A Figura 16 representa uma distribuição triangular, para uma amplitude unitária (KOTZ SAMUEL, 2004).

Figura 15- Distribuição retangular.



Fonte: O AUTOR, 2019.

Figura 16 - Distribuição triangular.





A função densidade de probabilidade P(X) é dada pela equação 37. A amplitude do intervalo é 2*a*:

$$P(X) = f(x) = \begin{cases} 4x, & 0 \le x \le 0,50\\ 4(1-x), & 0,5 \le x \le 1,00 \end{cases}$$
(37)

# 1.6.3 Distribuição normal

Quando várias medições sobre um mensurando são realizadas com um instrumento, não se obtém sempre o mesmo resultado, e sim resultados que oscilam de forma aproximadamente simétrica em torno do verdadeiro valor, representado pela medida de tendência central (CORREA, 2003). Essa distribuição de probabilidades gerada, designada distribuição normal, tem como parâmetros a média e o desvio padrão. Sua função de densidade de probabilidade é dada pela equação 38:

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}, \quad -\infty < X < +\infty$$
(38)

P(X) é dependente tanto da média quanto do desvio padrão do intervalo de dados. De posse de tais parâmetros, é possível calcular as probabilidades de ocorrência do evento  $X = x_i$ , e sua distribuição de probabilidades dar-se-á pela soma de P(X) sobre o intervalo. Como é uma varável contínua, integra-se P(X), denotada por F(X), cujo valor da área reflete a probabilidade de ocorrência do evento  $x_i$ , conforme equação 39:

$$F(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dx = 1$$
 (39)

A Figura 17 mostra o comportamento da distribuição de probabilidade normal. Observe a média  $\mu$  como o valor de tendência central e a dispersão  $\sigma$ , bem como a simetria em torno da média.

A probabilidade de ocorrência de um evento é dada pela área sob a curva do gráfico A Figura 18 exemplifica com os valores usuais de probabilidades para a dsitribuição normal. Para uma dispersão de 1 desvio padrão em torno da média, a probabilidade é de 68,26 % de chances da variável aleatória assumir um valor entre  $\mu - \sigma \in \mu + \sigma$ .

Os certificados de calibrações, por exemplo, apresentam como resultado final uma incerteza com um coeficiente de abrangência equivalente a 2 desvios padrões; isso quer dizer que a probabilidade da variável aleatória estar entre  $\mu - 2\sigma e \mu + 2\sigma é$  de 95,46 %. Ou ainda: de 100 medições realizadas, em 95,46 % das vezes o valor da variável aleatória estará com 2 desvios padrões de dispersão em torno da média.









Um fato histórico importante acerca da distribuição normal é relatado por (Correa, 2003, p. 79):

Supunha-se inicialmente que todos os fenômenos da vida real devessem ajustar-se a uma curva em forma de sino; em caso contrário, suspeitava-se de alguma anormalidade no processo de coleta de dados. Daí a designação de curva normal.

As medidas de dispersão são de fundamental importância, pois permitirá a avaliação das incertezas das medições combinadas  $u_c$  e expandidas  $U_E$ .

#### 1.7 Avaliação das incertezas da medição

A medição é o ato de atribuir valor a uma grandeza, gerando assim a medida da grandeza, ou resultado da medição. O resultado contém, além do valor da grandeza, informações pertinentes ao processo de medição do mensurando, ou incertezas. A incerteza da medição é um parâmetro, não negativo, como por exemplo o desvio padrão, que reflete a dispersão dos valores das medições realizadas em um mensurando (INMETRO, 2012a), ou ainda, o tratamento das incertezas é um parâmetro estatístico que descreve as possíveis flutuações do resultado de uma medição (VERONIKA R, 2007).

Segundo (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, p.5):

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não-representativa a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição
- e) imperfeita das condições ambientais;
- f) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- g) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- h) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no
- j) algoritmo de redução de dados;
- k) aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Ainda segundo (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012b), A Recomendação INC-1 (1980) do Grupo de Trabalho sobre a Declaração de Incertezas agrupa os componentes da incerteza em dois grupos: incertezas do tipo A e incertas do tipo B, que está associada ao método de avaliação das mesmas.

O valor do mensurando pode ser dependente de várias variáveis, ou grandezas de entrada, de forma a existir uma relação funcional entre o valor do mensurado e das variáveis envolvidas no processo da mensuração. Segundo O Guia Para Expressão de Medição (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, p.9), as grandezas de entrada podem ser:

> — Grandezas cujos valores e incertezas podem ser diretamente determinados na medição em curso.

— Grandezas cujos valores e incertezas são incorporados à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas com padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados e dados de referência obtidos de manuais técnicos

# 1.7.1 Incertezas tipo A e tipo B.

As incertezas podem ser classificadas em tipo A e tipo B. Incertezas tipo A são aquelas que podem ser avaliadas através de técnicas estatísticas, enquanto incertezas do tipo B são estimadas empregando outas fontes tais como dados de experimentos passados, informações de certificados de calibração, especificações de fabricantes, publicações e referências técnicas, etc. (Lewis, et al., 2005).

A incerteza tipo A é o desvio padrão dado pela equação 32, página 41. A incerteza tipo B é dada pela equação 40, sendo D o divisor correspondente ao tipo de distribuição: retangular, triangular ou normal, respectivamente:

$$u_B = \frac{A}{2\sqrt{D}} \tag{40}$$

A é a amplitude do intervalor e D assume o valor de 3 para distribuição retangular, 6 para distribuição triangular e 1 para distribuição normal.

O mensurando Y pode ser modelado através da função f, dada pela equação 41, com  $X_N$  variáveis ou grandezas de entrada:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$$
(41)

Estes valores e incertezas podem ser obtidos, por exemplo, de uma única observação, de observações repetidas, ou de julgamento baseado na experiência, e podem envolver a determinação de correções em leituras de instrumentos e correções por conta de grandezas de influência, tais como temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade;

Sendo que cada grandeza  $X_N$  poderá ser obtida via série estatística ou via referências externas. Por exemplo, para mensurar a grandeza velocidade Y de um carro, a função *f* terá duas varáveis:  $X_1$ , a posição dada em metros, e  $X_2$ , o tempo dado em segundos, como mostrado na equação 42:

$$Y = V = f(X_1, X_2) = f(posição, tempo) = \frac{x}{t}$$
(42)

Caso fossem considerados fatores de correção oriundos de certificados da velocidade e tempo, por exemplo, a equação 43 seria usada:

$$V = f(posição, tempo, k_1, k_2) = \frac{x}{t} k_1 k_2$$
(43)

Mas há situações simplórias onde o mensurando depende apenas de uma variável  $X_1$ , como por exemplo a medição de cargas elétricas M, que é a média de  $x_n$ medidas independentes de cargas elétricas, como mostrado na equação 44:

$$Y = M = f(X_1) = f((x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n) = f(\overline{X_1}) = \overline{M}$$
(44)

Ou seja, o mensurando Y é a média aritmética das medidas independentes das cargas elétricas. Obviamente, há uma dispersão em torna da média  $\overline{M}$ , que é uma medida de tendência central. Essa dispersão será o desvio padrão, ou incerteza padrão da grandeza de entrada ( $\overline{X}_i$ ). Mesmo raciocínio acontece caso existam outras grandezas de entrada; sempre haverá uma medida de dispersão associada.

#### 1.7.2 Incertezas combinada, combinada relativa e expandida

As dispersões, quando combinadas, representam a dispersão total do valor do mensurando, dado por uma medida de tendência central. A incerteza padrão combinada é a raiz quadrada positiva da variância combinada (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012b), dada pela equação 45 para N grandezas de entrada:

$$u_{c}(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}}\right)^{2} u^{2}(x_{i})}$$
(45)

Onde y é relação funcional dada pela equação 41.

A derivada parcial denota o coeficiente de sensibilidade, e diz o quanto a grandeza de entrada  $x_i$  varia em relação a grandeza de saída Y (MATTEUCCI, DINIS e GUIMARÃES, 2017). O termo quadrático  $u^2(x_i)$  é a incerteza padrão da grandeza  $x_i$ .

Caso o modelo do mensurando consista apenas de termos multiplicativos ou divisórios, da forma (ab)/(ac), a equação 46 pode ser simplificada, obtendo-se a incerteza padrão combinada relativa, como sugere Veronika (2007, p.20):

$$u_{c}(y)(\%) = \frac{u_{c}(y)}{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{u(x_{i})}{x_{i}}\right)^{2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (u_{i})^{2}}$$
(46)

Multiplicando a equação 46 por um fator k, chamado fator de abrangência, temse um intervalo dentro do qual se espera encontrar o valor verdadeiro do mensurando com maior confiança (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012b). Esse fator é dependente da distribuição de probabilidade a qual pertencem as medidas realizadas sobre o mensurando, e é dependente também dos graus de liberdade. O produto da multiplicação de k pela incerteza combinada  $u_c(y)$  ou incerteza combinada relativa  $u_c(y)(\%)$  caracteriza a incerteza expandida  $U_E$  e incerteza expandida relativa  $U_E(\%)$ , respectivamente, apresentadas pelas equações 47 e 48:

$$U_E = k. u_c(y) \tag{47}$$

$$U_E(\%) = k. u_c(y)(\%)$$
(48)

#### 1.7.3 Graus de liberdade efetivo

Graus de liberdade é o número de variável livres em um sistema. Dadas n observações  $X_1, X_2 \dots X_n$  e desejando-se calcular a média, tem-se n graus de libertdade, pois é preciso conhecer cada variável. No cálculo do desvio padrão por exemplo, é necessário conhecer o valor da média, o que implica em menos um grau de liberdade (VIALI)

Sendo assim, os graus de liberdade  $v_i$  para medidas oriundas de séries estatísticas serão sempre dados por:

$$\nu_i = n - 1 \tag{49}$$

E para informações não oriundas de séries estatísticas, serão dados por:

 $v_i = \infty \tag{50}$ 

pois considera-se zero a probabilidade do valor estar fora do intervalo dado pela distribuição de probabilidade.

O fator de abrangência k é melhor calculado quando se leva em conta os graus de liberdade das grandezas de entrada do mensurado e não somente os desvios padrões dados pela distribuição normal. Quando combinados os graus de liberdade de cada grandeza de entrada, é possível calcular os graus de liberdade efetivos  $v_{eff}$ , dado pela equação 51:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{\sum_{i=1}^{N} u_i^4(y)}{v_i}}$$
(51)

Onde  $u_c$  é a incerteza padrão combinada,  $u_i$  a incerteza padrão da grandeza de entrada e  $v_i$  os graus de liberdades da grandeza de entrada. Os graus de liberdade  $v_{eff}$  são dependentes da distribuição t-Student. Essa distribuição é empregada para amostras pequenas, usualmente  $n \le 30$ , quando não se conhece a medida de dispersão  $\sigma$  e a população a qual pertence a mostra tem distribuição essencialmente normal. (**Unsupported source type (DocumentFromInternetSite) for source eec19.**).

A tabela 13 (ANEXO -Tabela t-Student) página 104, apresenta a relação entre os níveis os graus de liberdade, nível de confiança e fator de abrangência.

#### 1.8 Norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015

A norma ABNT NBR ISO 4037 intitulada "Radiação X e gama de referência para calibração de dosímetros e medidores de taxa de dose e determinação da resposta em função da energia do fóton" divide-se em 4 partes, a saber:

**Parte 1:** características da radiação e métodos de produção. Diz respeito às exigências para se estabelecer feixes de raios x e feixes de raios gama de referências para fins de calibração de dosímetros e monitores de taxa de dose para radioproteção nas faixas de 10 μGy.h<sup>-1</sup> a 10 Gy.h<sup>-1</sup>.

São apresentados 4 conjuntos de radiação de referência: radiação x filtrada contínua e radiação gama do Am-241, 7 keV a 250 keV; radiação x de fluorescência, 8 keV a 100 keV; radiação gama emitida por radionuclídeos, 600 keV a 1,3 MeV e radiação gama produzida por reatores e aceleradores, 4 MeV a 9 MeV.

O grupo radiação x filtrada contínua e radiação gama do Am-241 subdivide-se em quatro séries, além daquela do Am-241: série de baixa taxa de kerma no ar, série de espectro estreito, série de espectro largo e série de alta taxa de kerma no ar. O desenvolvimento do presente trabalho é referente à série de espectros estreitos, cujas características constam na (Tabela 2).

**Parte 2:** dosimetria para proteção radiológica no intervalo de 8keV a 1,3 MeV e 4 MeV a 9 MeV. São especificados procedimentos de calibração para dosímetros que operam nas referidas faixas de energia.

**Parte 3**: calibração de dosímetros de área e pessoal e medidas de suas respostas como função da energia e ângulo de incidência. São especificados procedimentos de calibração para dosímetros de área e pessoal na faixa de 8 keV a 9 MeV.

**Parte 4:** calibração de dosímetros de área e pessoal em feixes de referência de baixas energias. São dadas orientações adicionais referentes à caracterização dos feixes de fótons para baixas energias.

Na série dos espectros estreitos, ou série N, objeto de interesse do presente trabalho, prima-se por baixas resoluções espectrais, a fim de se obter uma melhor resposta energética do detector de radiação.

Para a caracterização das qualidades constantes na série N, são oferecidas duas alternativas: por curva de atenuação ou por espectrometria, sendo a segunda opção escolhida no presente trabalho. A Tabela 1 mostra a energia média, tensão do tubo, filtrações adicionais e primeiras e segundas CSR de cada qualidade.

Usualmente, a qualidade do espectro estreito é identificada por N seguido da tensão do tubo.

Em ambas as alternativas, com o intuito de garantir uma produção o mais uniforme possível dos feixes de raios x, o potencial do tubo deverá manter-se estável em ± 1 % quando em operação; o *ripple*<sup>1</sup> do tubo deverá ser menor do que 10 %; a angulação do anodo deve ser de 20 °; as filtrações adicionais utilizadas devem atender as especificações apresentadas na Tabela 2; com o objetivo de eliminar radiações de baixa energia e espalhada oriundas do tubo e das filtrações adicionais, a disposição dos filtros deverá ser do maior para o de menor número atômico, e a filtração inerente deverá ser estimada para a tensão de 60 kV de forma a se ter uma filtração total equivalente a 4 mm de alumínio. Essa filtração deverá ser usada para tensões acima de 60 kV (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015).

Energia	Resolução	Tensão (kV)	Filtração adicional (mm)			I <sup>o</sup> CSR	2º CSR
média	espectral					(mm)	(mm)
(keV)	(%)		Sn	Cu	ΑΙ		
8	28	10			0,1	0,047	0,052 AI
12	33	15			0,5	0,14 Al	0,16 Al
16	34	20			1,0	0,32 AI	0,37 AI
20	33	25			2,0	0,66 AI	0,73 AI
24	32	30			4,0	1,15 Al	1,30 AI
33	30	40		0,21		0,084 Cu	0,091 Cu
48	36	60		0,6		0,24 Cu	0,26 Cu
65	32	80		2,0		0,58 Cu	0,62 Cu
83	28	100		5,0		1,11 Cu	1,17 Cu
110	27	120	1,0	5,0		1,71 Cu	1,77 Cu
118	37	150	2,5			2,36 Cu	2,47 Cu

Tabela 1 ·	<ul> <li>Condições</li> </ul>	de irradiação	para a série do	os espectros es	streitos, série N.
------------	-------------------------------	---------------	-----------------	-----------------	--------------------

Fonte: Norma ABNT NBR ISO 4037, 2015. Adaptada pelo autor.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Definido com a diferença entre a tensão de pico e a tensão mínima dividida pela tensão de pico. Multiplica-se por 100 para o resultado em porcentagem.

#### 1.8.1 <u>Caracterização do feixe por curva de atenuação</u>

Caso o laboratório opte pela caracterização das qualidades N via curva de atenuação, uma câmara de ionização com resposta conhecida de kerma no ar por gray deverá ser utilizada, respeitando sua faixa de operação energética informada pelo fabricante.

Deverá ser determinada uma curva experimental ln(kerma) versus d, sendo d dado em milímetros de alumínio ou cobre. Os valores das primeiras e segundas CSR estimadas devem concordar em  $\pm 5$  % com aqueles constantes na Tabela 2.

A câmara de ionização deverá ser posiciona a uma distância de 100 centímetros do ponto focal do tubo, obedecendo geometria de feixe estreito, i.e., contabilizando apenas fótons provenientes do feixe primário.

Caso o valor da CSR preconizada pela norma não seja atingido experimentalmente no potencial nominal, dado pela tabela 2, um ajuste por tentativa e erro no mesmo deverá ocorrer, até que se atinjam os valores normativos. (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015).

#### 1.8.2 Caracterização do feixe por espectrometria

Caso o laboratório opte pela caracterização das qualidades N via espectrometria, as energias médias dos espectros e suas resoluções espectrais, FWHM, obtidos experimentalmente deverão concordar em de  $\pm 5$  % e  $\pm 15$  % daquelas constantes na Tabela 1 para energias menores do que 30 keV. Para as demais energias,  $\pm 3$  % e  $\pm 10$  %.

Para espectros nos quais existam picos de radiação características, esses não deverão ser consideradas na determinação da resolução espectral (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015).

Tanto a curva de eficiência do detector do espectrômetro quanto sua composição deverão ser levados em consideração, pois dependendo da energia, uma correção espectral é necessária em função da produção de raios x característicos e espalhamento Compton no volume sensível do detector (JOSILENE C. SANTOS, 2016).

# 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais e métodos empregados na caracterização das condições de irradiação para a série de espectros estreitos, ou N.

# 2.1 Materiais

Segue uma descrição dos equipamentos utilizados nesse trabalho:

 tubo de raios x industrial Comet, alvo de W, modelo MXR-160/22 com tensão e corrente nominais máximas de160 kV e 40 mA, respectivamente; com janela de 0,8 mm de Be;

 - conjunto dosimétrico composto pelo eletrômetro Keythley modelo 6517B e câmara de ionização cilíndrica dedicada para radioproteção PTW 23361, faixa de resposta 30 keV à Co-60 e certificado de calibração LMNRI 0648/2019. Vide anexo 2, p. 105.

 detector semicondutor para raios X e gama Amptek XR-100 CdTe, amplificador e analisador multicanal de pulsos Amptek PX5; Colimador de W com diâmetro de 400 µm de diâmetro e 2mm de espessura;

 disparador, que é o dispositivo eletrônico que interrompe ou permite a passagem do feixe de raios x

 monitor multipropósito Vaisala, para medição da temperatura, pressão e umidade relativa do ar, certificados E10044B/20 para pressão e E10044A/20 para temperatura e umidade relativa do ar.

- trena milimetrada, certificado D-5854/18

- laser de posicionamento transversal e longitudinal, cabos triaxiais;

filtros de alumínio, cobre e estanho com pureza 99,99 % e espessuras 0,1 mm, 0,2 mm, 0,5 mm e 1,0 mm, respectivamente.

# 2.2 Metodologia para caracterização dos feixes

Foi determinado a filtração inerente do tubo de raios x para 60 kV, sem filtração adicional. Posteriormente, o feixe de raios x para cada qualidade N foi caracterizado via espectrometria. Por fim, foram realizadas medições com a câmara de ionização PTW 23361.

A Figura 19 apresenta o arranjo experimental da aquisição via espectro das qualidades N.

A Figura 20 apresenta o arranjo experimental para aquisição das medidas de referência com as câmaras de ionizações após caracterização das qualidades através da espectrometria. São mostradas as distâncias do primeiro e segundo colimador e câmara de ionização PTW 23361 ao ponto focal do tubo.

Após o tubo de raios x, com janela de 0,8 mm de Be, tem-se o disparador, dispositivo eletrônico que interrompe ou permite a passagem do feixe de raios x. Em seguida, o primeiro colimador, distante 30 cm do ponto focal do tubo e com 3 cm de diâmetro e 5 mm de espessura de chumbo; o segundo colimador distante 50 cm do ponto focal do tubo e com 5 cm de diâmetro e 4 mm de espessura de chumbo. A câmara de ionização é posicionada a 100 centímetros do ponto focal, com todo o volume sensível dentro do campo de radiação, com 10 cm diâmetro.

Um cabo triaxial conecta a câmara ao eletrômetro, na sala de comando, onde também se encontra o controle do disparador e o painel de comando do tubo de raios x, mostrados na Figura 21. O cabo não está visível.



Figura 19 - Arranjo experimental para aquisição das medidas via espectrometria.

A) Detector de CdTe, B) Analisador multicanal e amplificador PX5 e C) Colimador. Fonte: O AUTOR, 2019. Figura 20 - Arranjo experimental para aquisição das medidas de linha de base com a câmara PTW 23361.



Legenda:

A) tubo de raios x, B) Disparador, C) Primeiro colimador, D) segundo colimador e) câmara de ionização.

Fonte: O AUTOR, 2019.

Figura 21 - Eletrômetro painel de controle do tubo de raios x, e controle do disparador.



Legenda:

A) Eletrômetro x, B) Painel de controle do tubo de raios x e C) controle do disparador. Fonte: O AUTOR, 2020.

#### 2.3 Metodologia para obtenção da filtração inerente do tubo de raios x

As condições ambientais foram tais que a temperatura média foi de 21 °C, pressão atmosférica média de 101,3 kPa e a umidade relativa do ar média de 50 %.

O tubo de raios x foi configurado para 60 kV e 2,1 mA. Foram realizadas 3 medições de cargas elétricas de 60 s com a câmara de ionização a 100 cm do tubo, sem qualquer tipo de filtração. Em seguida, foram adicionados filtros de alumínio até se obter a metade do valor inicial sem filtro, sendo tomadas 3 medições em cada adição de filtro.

A média das cargas elétricas em cada sequência foi multiplicada pela resposta nominal dada pelo fabricante da câmara,  $10^6 Gy. C^{-1}$ . Em seguida foi tomado o logaritmo natural. Um gráfico ln(K) x mm Al foi plotado, e através do ajuste da curva de interpolação a primeira CSR foi calculada.

A equação 52 foi utilizada na determinação da filtração adicional:

$$F_{Al,ad} = 4 - y \tag{52}$$

onde  $F_{Al,ad}$  é a filtração complementar para ser ter 4 mm, e y é a função mostrada na Figura 22.



Figura 22 - Relação entre a filtração inerente e a CSR obtida experimentalmente.

Fonte: O AUTOR, 2020.

# 2.4 Obtenção experimental dos espectros, energias médias e resoluções espectrais

Uma curva de calibração linear foi gerada antes da aquisição dos espectros, através do software DppMCA, fornecido pelo fabricante. Foi utilizada uma fonte de Am-241, com 5 picos de energia bem definidos.

Após o procedimento de rotina de *warm up* do tubo de raios x e calibração, o espectro de cada qualidade N foi adquirido com 1024 canais, tempo de aquisição de 240 s e tempo morto menor do que 5 %.

Cada espectro sofreu correções referentes a interação da radiação com o volume sensível do detector do espectrômetro, a saber: raios x característicos e Compton, que são originados no volume sensível do detector e geram sinais falsos, i.e., não oriundos do feixe primário. Correções da dependência energética do detector também foram feitas.

Adquiridos os espectros para cada qualidade N, devidamente corrigidos, a energia média e a resolução espectral foram calculadas com as equações 15 e 26, respectivamente. A componente  $\Delta E$  da equação 26 foi obtida com auxílio de uma planilha eletrônica. A integral da equação 15 foi substituída por somatórios, já que são fornecidos canais discretos de energia pelo espectrômetro.

# 2.5 Obtenção das CSR

Obtidas as energias médias espectrais, os valores das CSR foram calculados via interpolação da primeira coluna, energia média, com a sétima coluna, primeira CSR, da Tabela 1, página 53. Foram gerados dois gráficos, um referente às filtrações de alumínio e outro referente às filtrações de cobre. Os gráficos das Figuras 23 e 24 foram utilizados nas determinações dos valores das CSR em função da energia média calculada.

Para o alumínio, qualidades N10 a N30, e para o cobre, qualidades N40 a N150.

# Figura 23 - Valor da CSR em função da energia média calculada por interpolação, para o Al.



Fonte: O AUTOR, 2020.

Figura 24 - Valor da CSR em função da energia média calculada por interpolação, para o Cu.



Fonte: O AUTOR, 2020.

#### 2.6 Obtenção do kerma no ar

Para cada qualidade N listada na tabela 2, iniciando pela N60, a qualidade de referência (ABNT NBR ISO 4037-1, 2015), a câmara de ionização foi posicionada de

acordo com o arranjo experimental mostrado na Figura 19. Após o procedimento de *warm up* do tubo de raios x, realizado com o disparador fechado, a câmara ficou no mínimo 12 horas em estabilização ambiental, sob a tensão de + 300 V.

Posteriormente, a mesma foi irradiada por 10 minutos, na tensão referente a qualidade N60, 60 kV e corrente 10 mA. Iniciou-se então uma série de 5 medições de 10 s cada, previamente configuradas no disparador. Para cada medição de carga elétrica, foram coletadas também medidas de temperatura e pressão. Procedimento idêntico foi feito paras as demais qualidades N.

A média das cargas elétricas coletadas para N60, N80, N100 e N150 foram multiplicadas por seus respectivos  $N_k k_q$ , já que há rastreabilidade determinada para essas qualidades no LNMRI. As demais, foram multiplicadas pela resposta nominal dada pelo fabricante:  $10^6 Gy. C^{-1}$  (PTW, 2017). Foram aplicados também os fatores de correções para temperatura e pressão,  $k_{TP}$ , e recombinação iônica,  $k_s$ . Para o efeito de polarização,  $k_{Pol}$  foi considerado unitário, pois a calibração da câmara de referência ocorreu na mesma polaridade usada no LNMRI.

Conhecido o kerma no ar para N60, dado em Gy, e as taxas de kerma no ar para as demais qualidades N, dadas em Gy/s, foram calculados os tempos T em segundos para se atingir o kerma no ar de referência  $K_{N60}$ , através da equação 53.

$$T = \frac{K_{N60}}{\dot{K}_{Ni}} = \frac{K_{N60}}{\dot{K}_{Ni}}$$
(53)

Onde  $\dot{K}_{Ni}$  é a taxa de kerma no ar de uma das qualidades N. O resultado da medição é dado segundo a equação 54, que pode ser entendida como a função de modelagem Y dada pela equação 44, página 49, com fatores de correções.

$$K = \overline{M}. N_k k_q. k_{TP}. k_s. k_{Pol} \pm U_E$$
(54)

onde:

 $\overline{M} = \mu$ , conforme equação 27, a média das medidas de carga elétrica.

O coeficiente de calibração para N60 obtido no certificado de calibração emitido pelo LMNRI é dado por:

$$N_k k_q = 9,07.\,10^5 \,\frac{Gy}{C} \tag{55}$$

O fator de correção para temperatura e pressão a 20 °C e 101,3 kPa, respectivamente, é dado por (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2007):

$$k_{TP} = \left(\frac{273,2 + \mathrm{T}}{273,2 + 20}\right) \cdot \left(\frac{101,3}{\mathrm{P}}\right)$$
(56)

O fator de correção para recombinação iônica é dado por:

$$k_{s} = \frac{\left(\frac{V_{1}}{V_{2}}\right)^{2} - 1}{\left(\frac{V_{1}}{V_{2}}\right)^{2} - \frac{M_{1}}{M_{2}}}$$
(57)

onde:  $V_1$  e  $V_2$  são as tensões +300 V e +150 V, respectivamente,  $M_1$  e  $M_2$  são as médias das 5 medidas das cargas elétricas nas respectivas tensões (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2007).

O fator de correção para o efeito de polaridade, considerado unitário no presente trabalho, é dado por:

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M}$$
(58)

onde:  $M_+$  é a média das cargas elétricas para +300 V,  $M_-$  a média das cargas elétricas para -300 V e M a média das cargas elétricas para a tensão de rotina: 300 V (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2007).

Quando a calibração ocorrer na mesma polaridade, o valor de  $k_{pol}$  é unitário, uma vez que não haverá recombinações em função da mudança de polaridade. Nesse caso:  $|M_{-}| = |M_{+}| \rightarrow k_{pol} = 1$ .

A incerteza expandida  $U_E$  é aquela dada pela equação 47, página 51.

#### 2.7 Cálculo das incertezas

O mensurando é a grandeza carga elétrica. Para cada grandeza de entrada que se julgou ter influência no resultado do mensurando, suas incertezas foram calculadas.

As incertezas foram agrupadas em tipo A e tipo B, respectivamente. Para grandezas de entrada com mais de uma incerteza tipo B, essas foram combinadas em uma só.

As equações 32 e 33 foram usadas nos cálculos das incertezas tipo A, e a equação 40 nos cálculos das incertezas tipo B. As equações 46, 47 e 48 foram utilizadas na determinação das incertezas combinada relativa, expandida e expandida relativa, respectivamente.

Não foram consideradas correlações entre as grandezas; cada grandeza de entrada foi considerada independente.

#### 3 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados da filtração inerente e total, energias médias dos espectros e resoluções espectrais, CSR e kerma no ar com suas respectivas incertezas para as qualidades N.

Para N60, o cálculo de incerteza é apresentado de forma detalhado.

# 3.1 Filtração inerente e total

A Tabela 2 apresenta os resultados para o cálculo da filtração inerente. A média das cargas elétricas coletadas foi multiplicada pelo coeficiente de calibração referente à qualidade N60,  $N_k$ .  $k_q = 9,07.10^5$  Gy.  $C^{-1}$ .

Tabela 2 - Medidas	para obten	ção da	filtração	inerente.
		•	•	

	nC						
Al (mm)	1	2	3	μ	$s(\overline{\mu})$	Kerma (mGy)	ln(K)
0	43,789	43,687	43,712	43,729	0,053	39,667	3,680
0,102	23,690	23,679	23,711	23,693	0,016	21,492	3,068
0,207	15,644	15,684	15,670	15,670	0,02	14,210	2,654
0,314	11,775	11,788	11,801	11,788	0,013	10,693	2,370
Fonto O ALI							

Fonte: O AUTOR, 2020.

A Figura 25 apresenta o gráfico referente à determinação da CSR, cujo valor foi de 0,12 mm AI, correspondente à ln(k) = 2,99.



Figura 25 - Curva experimental para o cálculo da CSR para 60 kV, y=ln(k).

Substituindo a CSR na equação dada pela Figura 25, obtém-se 0,3 mm Al de filtração inerente. Usando a equação 52, a espessura de alumínio a ser adicionada de forma a se ter o equivalente de 4 mm Al de filtração total, conforme preconizado pela norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015 é:

$$F_{Al,ad} = 4 - 0.3 = 3.7 \, mm \, Al \tag{59}$$

A filtração inerente encontrada está consistente com aquela do LMNRI, que é de 0,31 mm AI (informação verbal)<sup>2</sup>.

# 3.2 Calibração do espectrômetro

A Figura 26-A apresenta as 5 energias definidas do Am-24. Para o primeiro, segundo e quinto picos, foi associado um canal no espectrômetro. A relação é linear, como mostrado na Figura 26-B.

Figura 26 - Espectro da fonte de referência Am-241 para calibração do espectrômetro.



<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Através de contato telefônico com o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI). Informação fornecida pelo Responsável Técnico (RT) Paulo Rosado.

# 3.3 Espectros, energias médias e resoluções espectrais

A Figura 27 apresenta a aquisição bruta do espectro N60, no software DppMCA, já calibrado como descrito na anteriormente.





A Figura 28 apresenta o espectro N60 após as correções serem aplicadas.

Figura 28 - Espectro corrigido com energia média e resolução espectral para N60.



Fonte: O AUTOR, 2020.

Fonte: O AUTOR, 2020.

Tais correções se referem à energia média e resolução espectral, calculadas pelas equações 15 e 26, respectivamente, com auxílio de planilhas eletrônicas, sendo o  $\Delta E$  da equação 26 calculado por uma funcionalidade da planilha eletrônica utilizada, como mostrado na Figura 29, originando a equação 56.

$$\Delta E = dx \tag{56}$$

Figura 29 - Largura a meia altura do espectro, representada pelo parâmetro dx na planilha de cálculo.



Fonte: O AUTOR, 2020.

Os espectros das qualidades N10 a N150 são apresentados nas Figuras 30 a 39, todos já com correções aplicadas.

Figura 30 - Espectro para N10.



Fonte: O AUTOR, 2020.



Fonte: O AUTOR, 2020.





Fonte: O AUTOR, 2020.

Figura 33 - Espectro para N25



Fonte: O AUTOR, 2020.

Figura 34 - Espectro para N30



Fonte: O AUTOR, 2020.
Figura 35 – Espectro para N40



Fonte: O AUTOR, 2020.

Figura 36 - Espectro para N80



Fonte: O AUTOR, 2020.





Fonte: O AUTOR, 2020.

Figura 38 - Espectro para N120



Fonte: O AUTOR, 2020.





Fonte: O AUTOR, 2020.

No espectro da Figura 31, N15, há três picos, todos oriundos das linhas espectrais do W, material do ânodo do tubo de raios x. Suas energias médias são 8,36 keV, 9,81 keV e 11,28 keV, respectivamente. A filtração de 0,5 mm Al da referida qualidade não é suficiente para uma atenuação significativa dessas energias. No espectro da Figura 37, N100, aparecem dois picos também provenientes das linhas espectrais do W, com energias 59,32 keV e 67,24 keV, respectivamente. Um terceiro pico aparece como decorrência do *k-edge* do W, 69,5 keV. (CENTER FOR X- RAY OPTICS AND ADVANCED LIGHT SOURCES, 2009).

A Tabela 3 apresenta os resultados das energias médias calculadas no presente trabalho bem como comparações com o laboratório de referência Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB (2015) e literatura: Herrati (2016), Deliang Zhang (2019) e (Tikkanen (2019).

A Tabela 4 apresenta os resultados das resoluções espectrais calculadas no presente trabalho em comparação com os valores de referência ISO N, laboratório Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), (2005) e literatura: Tapiovaara (2008), Larsson (2008) e Kurková (2016).

Todos os valores foram arredondados para o mesmo número de algarismos significativos apresentados pela norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015.

Em relação à energia média espectral, quando confrontados com os valores da normativos apresentados na terceira coluna da Tabela 3, as qualidades N120 e N150 apresentaram energias médias de 97 keV e 114 keV, respectivamente. Esses valores correspondem ao desvio máximo permitido pela norma: 3 %. Também apresentaram

as menores energias médias quando comparadas com os demais resultados nas mesmas qualidades, sendo que o PTB apresentou o maior valor para N150.

A qualidade de referência N60 apresentou o mesmo valor de energia, 47 keV, do que o PTB; correspondendo a um desvio de 2 % do valor normativo. Os demais resultados para essa qualidade foram 48 keV.

Para N40, apenas o PTB apresentou um valor diferente dos demais: 32 keV. O limite normativo é 3 % para as qualidades N10 a N30, e 5 % para as qualidades N40 a N150.

Energia média (keV)							
LABME- TRO	ISO N	РТВ	<sup>1</sup> Herrati	<sup>2</sup> Zhang	<sup>3</sup> Tikkanen		
8	8	8			8		
12	12	12			12		
16	16	16			16		
20	20	20			20		
24	24	24			24		
33	33	32	33		33		
47	48	47	48	48	48		
65	65	65	65	65	65		
83	83	84	83	83			
97	100	101	101	100			
114	118	120	119	118			
	LABME- TRO 8 12 16 20 24 33 47 65 83 97 114	LABME- TROISO N881212161620202424333347486565838397100114118	LABME- TROISO NPTB88812121216161620202024242433333247484765656583838497100101114118120	LABME- TROISO NPTB <sup>1</sup> Herrati88812121216161620202024242433333247484765656583838497100101114118120	Energia média (keV)LABME- TROISO NPTB <sup>1</sup> Herrati <sup>2</sup> Zhang888121212161616202020242424333332474847656565838397100101114118120114118		

Tabela 3 – Resultados e comparações das energias médias espectrais.

<sup>1</sup> Espectros simulados com Penelope.

<sup>2</sup> Espectros obtidos experimentalmente.

<sup>3</sup> Espectros simulados com MCNP

Fonte: O AUTOR, 2020.

As resoluções espectrais calculadas no presente trabalho apresentaram variações maiores do que a preconizada pela norma, 10 %, para as qualidades N120 e N150 com 11 % e 19 %, respectivamente.

Importante salientar que Kurková (2016) obteve para a resolução espectral da qualidade N150 um valor igual a 41 %, consistindo em um desvio em relação ao valor normativo de 11 %.

Os resultados encontrados para a resolução espectral para as demais qualidades estão coerentes tanto em relação aos valores normativos quanto aos valores de laboratórios e literatura, uma vez que estão dentro dos desvios normativos: 15 % até a qualidade N30 e 10 % da qualidade N40 a N150.

-	FWHM (%)						
Qualidade N	LABME- TRO	ISO N	PNNL	Tapiovaara	Larsson	Kurková	
10	27	28		28			
15	31	33		29	33		
20	32	34	34	31	36		
25	34	33	33	34	35		
30	33	32	32	32	32		
40	30	30	30	30	30		
60	36	36	36	37		35	
80	32	32	32	32		28	
100	26	28	28	28		29	
120	30	27	27	29		28	
150	44	37	37	39		41	

Tabela 4 - Resultados das resoluções espectrais, FWHM, e comparações com o PNNL e a literatura.

Fonte: O AUTOR, 2020.

#### 3.4 Valores interpolados das CSR

A Tabela 5 apresenta os valores das CSR obtidos por interpolação com auxílio dos gráficos das Figuras 23 e 24, respectivamente, bem como comparações com os laboratórios de referência PTB (2015), National Institute of Standards and Technology NIST (2019) e com a literatura: Herrati (2016), Matos (2020), Kurková (2016) e Larsson (2008).

Para N10, N100 e N150, os valores das CSRs do presente trabalho foram maiores em relação aos demais. N10 apresentou também o maior desvio em relação ao valor de referência dentre todas das qualidades N: 47 %. Para N40 e N60, os valores foram os menores dentre os das mesmas qualidades.

Para as qualidades compreendidas entre N40 e N150, i.e., aquelas cujas CSRs são dadas em cobre, apenas Larsson (2008) obteve para N40 um desvio de 13 % em relação ao valor de referência. Todos os demais obtiveram desvios menores do que 10 % para as mesmas qualidades.

Observou-se também que os desvios em relação aos valores de referência são maiores para as qualidades compreendidas entre N10 e N30, i.e., aquelas cujas CSRs são dadas em alumínio.

Tabela 5 –	Resultados das	s CSR e con	nparações co	m o PTB.	NIST e	literatura
			ipuluçõõõ õõ			ntoratara

N	LABME- TRO	ISO N	РТВ	NIST	Herrati	Matos	Kurková	Larsson
10	0,069	0,047	0,054	0,049				
15	0,17	0,14	0,159	0,153				0,13
20	0,38	0,32	0,36	0,351		0,34		0,32
25	0,68	0,66	0,67	0,76		0,66		0,65
30	1,17	1,15	1,18	1,16		1,16		1,17
40	0,079	0,084	0,09	0,082				0,082
60	0,22	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,26	
80	0,58	0,58	0,58	0,59	0,59	0,57	0,6	
100	1,16	1,11	1,10	1,14	1,13	1,08	1,09	
120	1,73	1,71	1,68	1,76	1,73		1,65	
150	2,45	2,36	2,33	2,41	2,40		2,2	

1º CSR (mm)

N10 a N30: CSRs são dadas em alumínio. N40 a N150: CSRs são dadas em cobre.

Fonte: O AUTOR, 2020.

#### 3.5 Kerma no ar para N60

A Tabela 6 apresenta as medidas referentes à qualidade N60, todas obtidas por série estatísticas. As duas últimas colunas mostram a média e o desvio padrão da média, respectivamente. A corrente elétrica utilizada no tubo foi de 10 mA.

Os valores de pressão e temperatura foram aqueles usuais da rotina do laboratório. A umidade relativa do ar não foi considerada, já que ela se encontra dentro do intervalo de 30 % a 80 %. Valores de umidade relativa do ar dentro desse intervalo podem ser ignorados para efeitos de correção (ATTIX, 2004).

	Π	$\mathbf{c}(\overline{\mu})$					
Grandeza de Entrada	1 2 3 4 5					- μ	3(μ)
Carga elétrica (nC)	0,2013	0,2018	0,2019	0,2019	0,2029	0,2020	0,0003
Temperatura (°C)	20,35	20,31	20,27	20,27	20,26	20,29	0,02
Pressão (kPa)	101,351	101,352	101,353	101,356	101,356	101,354	0,001
Tempo (s)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,00	0,0

Tabela 6 - Medidas das grandezas obtidas por série estatística para N60.

Fonte: O AUTOR, 2020.

O kerma no ar, sem os fatores de correção, é obtido pela multiplicação dos dois primeiros termos da equação 54, página 61:

$$K = \overline{M}.N_k == 1,8.10^{-4} Gy \tag{60}$$

Apresentando em taxa de dose:

$$\dot{K} = \frac{K}{t} = 0,6696.\,10^{-1}\,\frac{Gy}{h} \approx 67\,\frac{mGy}{h}$$
(61)

A taxa de kerma no ar  $\dot{K}$  foi arredondada para 2 algarismos significativos. Procedimento idêntico foi empregado na determinação das demais qualidades, sendo seus valores apresentados após o cálculo das incertezas.

#### 3.6 Cálculo das componentes de incertezas para N60

O cálculo das incertezas é apresentado para cada grandeza. Os valores das médias e desvios padrões da média foram arredondados para a resolução do instrumento de medição; os valores das incertezas foram arredondados para dois algarismos significativos e os valores dos fatores de correção foram arredondados para três algarismos significativos.

#### 3.6.1 Carga elétrica

Os valores constantes na Tabela 6 para carga elétrica foram utilizados:

A média é dada pela equação 27:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N} x_i = 0,2020 \ nC \tag{62}$$

A incerteza padrão tipo A foi calculada com a equação 33:

$$u_A = s(\bar{\mu}) = \frac{1}{\sqrt{n}}\sigma = \frac{1}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu - x_i)^2}{n-1}} = 0,0003 \ nC \tag{63}$$

Fazendo a razão das equações 63 e 62, tem-se a incerteza padrão relativa

$$u_A(\%) = \frac{u_A}{\mu} = \frac{0,0003}{0,2020} = 0,15\%$$
(64)

As incertezas tipo B foram calculadas conforme equação 40, página 49. A distribuição de probabilidades para a resolução do eletrômetro foi considerada retangular, como mostrado na equação 65:

$$u_{B,resolução} = \frac{0,0001 \, nC}{2\sqrt{3}} = 0,000029 \, nC \tag{65}$$

O valor da incerteza está na quinta casa decimal, uma casa decimal abaixo da resolução do eletrômetro. Portanto, é plausível desconsiderá-la. Logo, a incerteza relativa será nula.

$$u(\%)_{B,resolução} = \frac{u_A}{\mu} = \frac{0,0000}{0,2020} = 0\%$$
(66)

Para a incerteza referente ao certificado de calibração da câmara de ionização de referência, a equação 48, página 51, foi usada. O valor da incerteza expandida relativa  $U_E(\%)$  e o fator de abrangência informados no certificado são 2,6 % e 2, respectivamente:

$$u(\%)_{B,certificado} = \frac{U_E(\%)}{k} = \frac{2,6\%}{2} = 1,3\%$$
(67)

Combinando as três incertezas, através da equação 46, página 50, tem-se a incerteza combinada  $u_c(\%)$ :

$$u_{c}(\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} (u_{i})^{2}} = \sqrt{(0,15\%)^{2} + (0\%)^{2} + (1,3\%)^{2}} = 1,3\%$$
(68)

Como pode ser observado, a componente de incerteza dominante é aquela referente ao certificado de câmara da câmara: 1,3 %.

## 3.6.2 Fator de correção para temperatura e pressão

Os cálculos das médias e desvios padrões das médias da temperatura e pressão são apresentados pelas equações 69, 70, 71 e 72, respectivamente, com dados extraídos da Tabela 6. Os cálculos foram idênticos aos desenvolvidos para a grandeza carga elétrica.

$$\mu_{\text{temperatura}} = 20,29 \ ^{\circ}\text{C} \tag{69}$$

 $u_{A,temperatura} = 0,02 \ ^{\circ}\mathrm{C} \tag{70}$ 

$$\mu_{\text{pressão}} = 101,354 \ kPa \tag{71}$$

$$u_{A,pressão} = 0,001 \ kPa \tag{72}$$

O fator  $k_{TP}$ , dados pela equação 56, página 62, fica:

$$k_{TP} = \left(\frac{273,2 + 20,29}{293,2}\right) \cdot \left(\frac{101,3}{101,354}\right) = 1,00$$
(73)

Tanto as incertezas do tipo A quanto as do tipo B para temperatura e pressão propagam-se na incerteza do fator de correção  $k_{TP}$ . Fazendo  $f(T,P) = k_{TP}$  e aplicando a equação 45, propagação das incertezas, página 49, temos a incerteza combinada:

$$f(T,P) = \left(\frac{273,2 + T}{293,2}\right) \cdot \left(\frac{101,3}{P}\right) = \frac{94,4}{P} + 0,350.\frac{T}{P}$$
(74)

Calculando os coeficientes de sensibilidade:

$$\frac{\partial f(T,P)}{\partial T} = \frac{0,350}{P}$$
(75)

$$\frac{\partial f(T,P)}{\partial P} = -\frac{94,4}{P^2} - 0,350.\frac{T}{P^2} = -\frac{1}{P^2}.(94,4+0,350.T)$$
(76)

A incerteza combinada fica:

$$u_{c}(f(T,P)) = \sqrt{\sum_{i=1}^{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}}\right)^{2} u^{2}(x_{i})} = 6,98.\,10^{-5}$$
(77)

A incerteza combinada relativa fica:

$$u_c(\%)_{B,k_{TP}} = \frac{u_c}{k_{TP}} = \frac{6,98.\,10^{-5}}{1,00} = 0,0070\,\%$$
(78)

## 3.6.3 <u>Tempo</u>

A média do tempo de aquisição das medidas é dada pela equação 79, de acordo com a Tabela 6. O desvio padrão da média é nulo, já que o disparador sempre dará o mesmo valor no mostrador. A equação 80 nos dá o fator de correção ∆t para o tempo de abertura disparador (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2007).

$$\mu_{\text{tempo}} = 10,0 \ s$$

$$\Delta t = t \frac{K_1 - K_n}{K_n - nK_n} s \tag{80}$$

Onde:

$$K_n = \sum_{i=1}^{i=5} K_i \tag{81}$$

$$nK_n = \sum_{i=1}^{i=5} iK_i \tag{82}$$

onde t é o tempo inicial de 10 s,  $K_1$  é o kerma no ar para t, n é o número de medições do kerma no ar com 1/n do tempo t.

A Tabela 7 apresenta os resultados das medições para posterior cálculo da incerteza Δt.

n	Kn	Kerma no ar (Gy)	tempo (s)	nK₁ (Gy)
1	K <sub>1</sub>	1,83E-04	10	1,83E-04
2	K <sub>2</sub>	9,18E-05	5	3,65E-04
3	K <sub>3</sub>	6,03E-05	3,3	5,48E-04
4	K <sub>4</sub>	4,61E-05	2,5	7,31E-04
5	K <sub>5</sub>	3,64E-05	2	9,13E-04

Tabela 7 - Resultado das medições de kerma no ar para calcular a incerteza na abertura no disparador.

Fonte: O AUTOR, 2020.

Substituindo os valores na equação 81 e 82:

$$K_n = 4.2.10^{-4} \, Gy \tag{83}$$

$$nK_n = 0.01 \, Gy \tag{84}$$

Substituindo as equações 83 e 84 na equação 80:

$$\Delta t = 0.2 \text{ s} \tag{85}$$

A incerteza padrão e relativa são dadas pelas equações 86 e 87, respectivamente, sendo o resultado arrendado para resolução do disparador:

$$u_{B,tempo} = \frac{\Delta t}{2\sqrt{3}} = \frac{0.2 \text{ s}}{2\sqrt{3}} = 0.1 \text{ s}$$
(86)

$$u(\%)_{B,tempo} = \frac{u_{B,tempo}}{\mu} = \frac{0.1 \, s}{10.0 \, s} = 1.0 \,\%$$
(87)

#### 3.6.4 Corrente de fuga

A corrente de fuga foi calculada pela equação 88:

$$I = \frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1} = 3,67.10^{-6} A$$
(88)

onde  $Q_1$  é a carga inicial coletada em 60 s,  $Q_2$  é a carga final após decorridos 5 minutos com o tudo desligado;  $t_1$  é tempo inicial a partir do momento de em que o tubo é desligado, e  $t_2$  é o tempo final: 5 minutos após o desligamento do tubo.

As incertezas padrão e relativa são dadas pelas equações 89 e 90, respectivamente, com  $\mu = I$ .

$$u_{B,corrente\ de\ fuga} = \frac{1.10^{-8}\ A}{2\sqrt{3}} = 2,89.\ 10^{-9}\ A \tag{89}$$

$$u(\%)_{B,corrente\ de\ fuga} = \frac{u_{B,corrente\ de\ fuga}}{I} = 0,079\ \%$$
(90)

#### 3.6.5 Homogeneidade do campo de radiação

A curva da homogeneidade do campo de radiação, de 10 cm de diâmetro, é representada na Figura 40, para um alvo de tungstênio, angulação 20 º e mesmo arranjo experimental utilizado para as qualidades N. Pacífico, Peixoto e Magalhães (2017) calcularam a incerteza relativa da homogeneidade do campo de radiação, considerando o efeito anódico. O valor é apresentado pela equação 91:



Figura 40 - Homogeneidade do campo de radiação.

Fonte: PACÍFICO, PEIXOTO, MAGALHÊS, 2017.

### 3.6.6 Corrente do tubo de raios x

As incertezas padrão e relativa são dadas pelas equações 92 e 93, respectivamente, para um valor nominal de corrente apresentado no mostrador do controle do tubo de raios x de 10,0 mA:

$$u_{B,corrente} = \frac{0.1 \ mA}{2\sqrt{3}} = 0.029 \ mA \tag{92}$$

O valor de incerteza está abaixo da resolução do mostrador, logo, seu valor é desprezível.

$$u(\%)_{B,corrente} = \frac{0 \ mA}{10,0 \ mA} = 0 \ \%$$
(93)

#### 3.6.7 Tensão do tubo de raios x

As incertezas padrão e relativa são dadas pelas equações 94 e 95, respectivamente, para um valor nominal de tensão apresentado no mostrador do controle do tubo de raios x de 60 kV:

(91)

$$u_{B,tensão} = \frac{60 \ kV}{2\sqrt{3}} = 0,29 \ kV \tag{94}$$

A incerteza está abaixo da resolução, podendo ser desprezada e resultando em uma incerteza relativa nula:

$$u(\%)_{B,tubo} = \frac{0 \ kV}{60 \ kV} = 0 \ \% \tag{95}$$

#### 3.6.8 Estabilidade da câmara de ionização

As medições referentes à estabilidade da câmara de ionização foram realizadas na qualidade N60, nas datas apresentadas na Tabela 8. Cada medida é o valor médio de 5 medidas. O tempo de aquisição das cargas elétricas foi de 10 s, uma corrente de 10,0 mA e tensão + 300 V.

Tabela 8 - Histórico das medições realizadas.

Data da medição	Carga (nC)	D (nC)	E
31/01/2018	0,2080	0,0024	
15/03/2019	0,2044	0,0012	4 00/
31/01/2020	0,2053	0,0003	1,2%
03/03/2020	0,2047	0,0009	

Fonte: O AUTOR, 2020.

A medida de carga elétrica de referência,  $x_{ref}$ , é a média daquelas constantes na Tabela 8, dada pela equação 96. A diferença D, equação 97, entre o valor de carga elétrica *x* e valor  $x_{ref}$ , pode ser utilizado no cálculo da estabilidade *E*, dada pela equação 99.

$$x_{ref} = 0,2056 \, nC$$
 (96)

$$D = \left| x - x_{ref} \right| \tag{97}$$

Consultando a Tabela 8, a maior diferença ocorreu no dia 31/01/2018, onde  $D = D_{maximo} = 0,0024 \ nC.$ 

$$E = \frac{D_{maximo}}{x_{ref}} \cdot 100 = \frac{0,0024 \ nC}{0,2056 \ nC} \cdot 100 = 1,2 \ \%$$
(98)

Fazendo  $u_{B,estabilidade} = D_{maximo}$ , uma vez que *D* é uma medida de dispersão, e  $\mu = x_{ref}$ , a incerteza relativa fica:

$$u(\%)_{B,estabilidade} = \frac{u_{B,estabilidade}}{\mu} = \frac{D_{m\acute{a}ximo}}{x_{ref}} = E = 1,2\%$$
(99)

O valor de *E* foi arredondado para 2 algarismos significativos.

#### 3.6.9 Espessura da filtração adicional

Para N60, a espessura nominal da filtração adicional de cobre é 0,6 mm. As incertezas padrão e relativa são dadas pelas equações 100 e 101, respectivamente

$$u_{B,filtro} = \frac{A}{2\sqrt{D}} = \frac{0.1 \ mm \ Cu}{2\sqrt{3}} = 0.029 \ mm \ Cu \tag{100}$$

O valor de incerteza está na segunda casa decimal do valor nominal. Logo, seu valor é desprezível. A incerteza relativa é nula.

$$u(\%)_{B,filtro} = 0\%$$
(101)

#### 3.6.10 Posicionamento

A largura nominal do *laser* é 1 mm. Como há dois *lasers*, um para posicionamento vertical e outro para posicionamento horizontal: As incertezas de cada componente são dadas pelas equações 102 e 103, respectivamente.

$$u_{B,vertical} = \frac{1 mm}{2\sqrt{3}} = 0,29 mm Cu$$
 (102)

$$u_{B,horizontal} = \frac{1 mm}{2\sqrt{3}} = 0,29 mm Cu$$
 (103)

$$u_c = \sqrt{\left(u_{B,vertical}\right)^2 + \left(u_{B,horizontal}\right)^2} = 0,41 \, mm \tag{104}$$

Sendo  $u_c = u_{B,posicionamento}$ . A incerteza está na segunda casa decimal, podendo ser desprezada.

A incerteza relativa fica:

$$u(\%)_{B,posicionamento} = 0 \%$$
(105)

## 3.6.11 Fator de recombinação iônica

O cálculo do fator de correção para a perda por recombinação iônica é mostrado na equação 106.

$$k_{s} = \frac{\left(\frac{V_{1}}{V_{2}}\right)^{2} \cdot 1}{\left(\frac{V_{1}}{V_{2}}\right)^{2} \cdot \frac{M_{1}}{M_{2}}} = 1,01$$
(106)

As incertezas padrão e relativa são dadas pelas equações 107 e 108, respectivamente, sendo  $\mu = k_{\rm s}.$ 

$$u_{B,k_s} = \frac{A}{2\sqrt{D}} = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.0029 \tag{107}$$

$$u(\%)_{B,k_s} = \frac{0,0029}{1,01} = 0,0029 = 0,29\%$$
(108)

## 3.7 Cálculo das incertezas expandida e combinada para N60

Usando a equação 46, página 51, a incerteza combinada relativa fica:

$$u_c(\bar{M})(\%) = \left(\sum_{i=1}^{10} (u_i)^2\right)^{\frac{1}{2}} = 2,0\%$$
(109)

A incerteza combinada é dada pela equação 110, onde  $\overline{M}$  é a médias das cargas elétricas dada pela equação 62, página 78:

$$u_c(\bar{M}) = u_c(\bar{M})(\%).\,\bar{M} = (2,0\,\%).\,0,2020\,nC = 0,0040\,nC \tag{110}$$

O número de graus de liberdade efetivos é calculado através da equação 51, página 51, com  $y = \overline{M}$  e n = 4.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\overline{M})}{\frac{\sum_{i=1}^N u_i^4(\overline{M})}{v_i}} = 13 \ graus \ de \ liberdada \ efetivos \tag{111}$$

Para incertezas padrões do tipo B, as frações se anulam, pois se tem infinitos graus de liberdade.

Consultando a Tabela t-Student, Anexo, página 104, para um nível de confiança de 95 % k = 2,16 já que que  $v_{eff} = 13$ . Porém, é de praxe arredondar K para um algarismo significativo, resultando em % k = 2. Usando as equações 47 e 48, página 50, tem-se as incertezas expandida e expandida relativa, dadas pelas equações 112 e 113, respectivamente:

$$U_E = 2.0,0040 \ nC = 0,0080 \ nC \tag{112}$$

$$U_E(\%) = 2.(2,0\%) = 4,0\%$$
(113)

Após os cálculos dos fatores de correções e incertezas, o resultado da medição da carga elétrica para N60, dado pela equação 54, página 61, pode então ser expresso como se segue:

$$K = 1,8.10^{-4} Gy \pm 4,0\%$$
(114)

 $K = (1.8 \pm 0.072) 10^{-4} \, Gy \tag{115}$ 

O valor final do kerma no ar foi arredondado para 2 algarismos significativos. Para o cálculo da taxa de kerma no ar, a equação 53, página 62, foi utilizada. O tempo de aquisição foi 10 de s e a corrente elétrica de 10 mA, respectivamente:

$$\dot{K} = 65 \ \frac{mGy}{h} \tag{116}$$

Acrescentando a incerteza:

$$\dot{K} = (65 \pm 2,6) \, \frac{mGy}{h}$$
(117)

A tabela 9 resume os cálculos de incertezas para N60.

Observa-se que as fontes de incertezas que mais contribuem no processo são: aquelas referentes à coleta da carga elétrica, 1,3 %; estabilidade da câmara de ionização, 1,2 % e tempo de aquisição, 1,0 %.

#### 3.8 Cálculo das demais incertezas

Para as qualidades N15 a N40, as incertezas expandidas dos certificados foram obtidas por interpolação dos dados publicados por Matos (2020); a incerteza expandida para a qualidade N10 foi obtida por extrapolação da curva obtida por interpolação, como mostrado pelas linhas tracejadas na (Figura 41).

Há rastreabilidade metrológica para as qualidades N60, N80, N100 e N150, todas com incerteza padrão de 1,3 %. Para N120, a incerteza foi considerada como sendo a média das incertezas N100 e N150, 1,3 %. A Figura 41 apresenta a função de interpolação obtida e sua extrapolação até a tensão de 10 kV; a Tabela 10 mostra os valores das incertezas obtidas por interpolação e extrapolação.

A função de ajuste escolhida foi linear, como mostrado na Figura 41. Também foram testadas funções polinomiais de grau 2 e 3; porém ambas mantiveram o coeficiente de determinação, R<sup>2</sup>, igual a 0,9538. Portanto, partiu-se da hipótese que o comportamento das incertezas padrões relativas é linear em função da tensão, além de ser compatível com o coeficiente de abrangência adotado: 95 %.

n	Grandeza de Entrada	valor	Unidade	Incerteza tipo		Incerteza Relativa (%)
				Α	В	
1	Carga elétrica	0,2020	nC	0,0003	0,00263	1,3%
2	K <sub>TP</sub>	1,00	Ad		6,98E-05	0,0070%
3	Tempo	10	S		0,1	1,0%
4	Corrente de fuga	3,67E-06	А		2,89E-09	0,079%
5	Homogeneidade do campo	0,202	nC		0,00042	0,21%
6	Corrente do tubo de raios x	10,0	mA		0,03	0,00%
7	Tensão do tubo raios x	60	kV		0,3	0,00%
8	Estabilidade da câ- mara de ionização	0,2080	nC		0,0035	1,2%
9	Espessura da filtração adicional	0,6	mm Cu		0,03	0,0%
10	Posicionamento	1	mm Cu		0,41	0,0%
11	Fator de recombina- ção iônica	1,01	Ad		0,0029	0,29
			e efetivos =	13		
			Fato	or de abra	angência =	2
			Ince	erteza co	mbinada =	2,0 %
			Inc	erteza ex	kpandida =	4,0 %

Tabela 9 - Resumo das incertezas para N60.

Ad: adimensional.

Fonte: O AUTOR, 2020.

A qualidade N10, com tensão de 10 kV, apresentou o maior valor de incerteza: 11,8 %. Já a qualidade N40, com tensão de 40 kV, apresentou a menor incerteza: 3,3 %. Observa-se pela Figura 41 que à medida que a tensão diminui, e consequentemente a energia média espectral, há um aumento da incerteza. A Tabela 10 apresenta os valores das incertezas interpoladas e extrapolada para N10.





Tabela 10 - Resultado das interpolações e extrapolações para as componentes de incertezas de certificados.

Qualidade N	10	15	20	25	30	40
Incerteza in- terpolada (%)	5,4	5	4,7	4,3	4	3,3
Eante: O ALITOR	2020					

Fonte: O AUTOR, 2020.

A Tabela 11 apresenta um comparativo das incertezas expandidas do presente trabalho com dois laboratórios primários, PTB (2018) e IAEA (2016), o laboratório nacional LMNRI (2020) e o laboratório secundário LABPROSAUD (2020). Os valores sublinhados indicam as grandezas com rastreabilidade metrológica.

As qualidades N10 a N40 apresentam incertezas maiores, incertezas essas obtidas por interpolação e especificamente para N10 por extrapolação. As qualidades N60 à N100, todas com rastreabilidade metrológica, apresentaram valores de incertezas de 4,0 %, muito próximos daqueles apresentados pelo LABPROSAUD (2020), 4,4 %.

#### 3.9 Resultado geral

Como não há rastreabilidade para todas as qualidades caracterizadas, a obtenção do kerma no ar foi feita multiplicando-se o valor da carga elétrica coletada pela câmara de ionização pela resposta nominal, Gy/C, fornecida pelo fabricante. Desse modo, foi possível levantar uma curva de resposta da câmara de ionização.

	Incerteza expandida (%), k=2							
Qualidade N	LABMETRO	РТВ	IAEA	LMNRI	LABPROSAUD			
10	12	0,8	1,2					
15	10	0,8	1,2					
20	10	0,8	1,2		10			
25	10	0,8	1,2		8			
30	10	0,8	1,2		8			
40	8,0	0,8	1,2					
60	<u>4,0</u>	0,8	1,2	2,6	4,4			
80	<u>4,0</u>	0,8	1,2	2,6	4,4			
100	<u>4,0</u>	0,8	1,2	2,6	4,4			
120	4,0	0,8	1,2					
150	<u>4,0</u>	0,8	1,2	2,6				

Tabela 11 - Comparativo entra as incertezas expandidas com 2 laboratórios primários, o laboratório nacional e um laboratório secundário.

Fonte: O AUTOR, 2020.

A Tabela 12 apresenta os resultados gerais obtidos no presente trabalho. Foi utilizado um tempo de aquisição para todas as qualidades de 10 s.

A maior taxa de kerma no ar, 1,8.  $10^{-1} Gy/h$ , ocorreu para a qualidade N20; a menor taxa, 3,3.  $10^{-2} Gy/h$ , ocorreu para a qualidade N80.

A Tabela 13 apresenta os valores das correntes utilizadas, bem como os tempos ajustados segundo a equação 53, para se atingir o kerma no ar de referência dado por N60.

As correntes elétricas utilizadas foram tais que permitiram uma coleta de cargas significativa. Para N10, por questões de limitação do sistema de produção de raios x, a corrente utilizada foi 9 mA e não 10 mA. Para N100, N120 e N150, os valores das correntes foram maiores para compensar uma maior atenuação dos filtros de cobre e estanho.

Como o tempo base utilizado foi de 10s, referente à qualidade de referência N60, todos os demais foram ajustados para mais ou para menos, de forma a se ter o mesmo valor de kerma no ar obtido para N60. Tais tempos foram programados no disparador.

Não houve dependências energéticas para N40. Para as demais qualidades, a dependência energética foi de 5 %.

	Quali- dade N	Filtração adicional (mm)	Taxa de kerma no ar (Gy.h <sup>-1</sup> )	CSR (mm)	Energia média (keV)	Resolução espectral (%)	Incerteza Expandida (%)
	10	0,1	7,1E-02	0,069	8	27	12
	15	0,5	1,4E-01	0,17	12	31	10
A	20	1	1,8E-01	0,38	16	32	10
	25	2	1,6E-01	0,68	20	34	10
	30	4	9,0E-02	1,17	24	33	10
	40	0,21	4,3E-02	0,079	33	30	8,0
D	60	0,6	6,6E-02	0,22	47	36	4,0
S	80	2	3,3E-02	0,58	65	32	4,0
	100	5	4,9E-02	1,16	83	26	4,0
Sn + Cu	120	1 mm Sn + 5 mm Cu	4,23E-02	1,73 mm Cu	97	30	4,0
Sn	150	2,5 mm Sn	2,84E-01	2,45 mm Cu	114	44	4,0

Tabela 12 - Resultado geral.

Fonte: O AUTOR, 2020.

A Figura 42 apresenta a dependência energética da câmara de ionização em relação à qualidade de referência N60. Segundo Attix (2004), a dependência energética é dada pela razão entre o kerma no ar a ser comparado e o kerma no ar de referência.

As barras de incertezas correspondem à propagação das incertezas expandidas dadas na Tabela 12.

A maior incerteza encontrada foi para 8 keV, 12 %; a menor foi para as energias de 47 keV à 114 keV, todas com 4,0 %.

Apenas a qualidade N40 não apresentou dependência energética em relação à qualidade de referência N60. As demais apresentaram 5 % de dependência energética. As qualidades com filtração adicional de alumínio apresentaram incertezas maiores em relação às demais filtrações

	Enorgia	Corrente		Korma no ar	Dependência
Qualidade N		elétrica	Tempo (s)		Energética
	(Kev)	(mA)		(Gy)	(Gy /Gy <sub>r</sub> )
10	8	9	10,6	2,1E-04	1,05
15	12	10	5,4	2,1E-04	1,05
20	16	10	4,1	2,1E-04	1,05
25	20	10	4,64	2,1E-04	1,05
30	24	10	8,31	2,1E-04	1,05
40	33	10	17,1	2,0E-04	1,00
60	47	10	10	2,0E-04	1,00
80	65	10	20,4	2,1E-04	1,05
100	83	30	14	2,1E-04	1,05
120	97	20	17,8	2,1E-04	1,05
150	114	20	2,3	2,1E-04	1,05

Tabela 13 - Valores de corrente e tempo para aquisição de kerma no ar para cada qualidade N.

Fonte: O AUTOR, 2020





Fonte: O AUTOR, 2020.

.

#### 4 DISCUSSÃO

Na Figura 22, página 59, o valor mínimo da CSR é 0,33 mm Al, correspondendo a uma filtração inerente mínima de 0,25 mm Al. O valor da CSR experimental foi de 0,12 mm Al, abaixo dos valores fornecidos pela norma ABNT NBR ISO 4037-1:2015, de 2015, sendo então adotado o menor valor tabelado, 0,25 mm Al. O mesmo foi arredondado para uma casa decimal, 0,3 mm Al, para facilitar a obtenção da espessura do filtro físico a ser acrescentado à filtração inerente. A filtração total calculada, 3,7 mm Al, está próxima da obtida por Larsson (2008), 3,8 mm Al.

Em relação às energias espectrais médias, Tabela 3, página 74, há relativamente poucos dados na literatura para as qualidades N10, N15, N20, N25 e N30. Parece haver uma maior preocupação na caracterização da qualidade N60 e superiores. Mas é de fundamental importância a caracterização de todas as qualidades por apresentarem energias efetivas coerentes com as usadas clinicamente, desde a mamografia à tomografia, em um intervalo de 14 keV a 100 keV, como mostrado por Bushberg (2012, p. 50).

Para as qualidades N120 e N150, energias médias espectrais de 97 keV e 114 keV, respectivamente, a eficiência do composto CdTe sofre uma redução significativa, como mostrado na Figura 14, página 39. Tal fato poderia justificar a redução nas duas energias em relação aos valores normativos: 100 keV e 118 keV, respectivamente. Porém, Zhang (2019) obteve de forma experimental os mesmos valores normativos, e por simulação via código Penelope, Herrati (2016) obteve 101 keV e 119 keV, respectivamente, indicando assim a necessidade de uma revisão na aquisição dessas duas qualidades, principalmente em relação ao detector.

Para essas mesmas duas qualidades, os valores da resolução espectral 30 % e 44 %, respectivamente, foram maiores do que os valores normativos, 27 % e 37 % respectivamente, do PNNL (2015) e de Tapiovaara (2008), conforme mostrado na Tabela 4, página 75. Uma dispersão maior dos espectros nessas duas qualidades, N120 e N150 ao redor da energia média espectral, pode se justificar pelo diâmetro do colimador utilizado na aquisição de todos os espectros: 400 µm. Um diâmetro de 200 µm para essas qualidades específicas poderia reduzir a resolução espectral, já que haveria menos espalhamento Compton, dominante nessa faixa de energia; não necessariamente reduziria a energia média espectral, que pode ser consequência direta da

eficiência do composto TeCd na faixa de energia em questão, mesmo após aplicadas as correções espectrais para a eficiência.

Importante destacar o comportamento da resolução para energias próximas de 100 keV do detector CdTe, haja vista que Kurková (2016) também utilizou um detector de CdTe e encontrou uma resolução espectral acima dos valores normativos para a qualidade N150, correspondendo a energia média espectral de 118 keV. Já Tapiovaara (2008), ao utilizar um detector de germânio hiper puro (HPGe) encontrou uma diferença de 5 %. Para endossar, Correia (2016, p.51), em dados obtidos experimentalmente, concluiu que a resolução energética do HPGe é melhor do que a do CdTe.

Em relação às CSRs não houve o comportamento esperado de quanto maior a CSR, maior a energia média espectral. A título de exemplo, PTB (2015) obteve para N120 um valor de 1,68 mm Al, abaixo do valor normativo de 1,71 mm Al, como mostrado na Tabela 5 página 73. No entanto, obteve o mesmo valor normativo para a energia média espectral, não um valor abaixo, como era de se esperar; para a qualidade N100, o LABMETRO obteve o valor de 1,16 mm Al, acimo do normativo de 1,11 mm Al. Já em relação a energia média espectral, obteve o mesmo valor normativo: 83 keV, e não um valor maior, como seria de se esperar.

Importante salientar que a norma não oferece uma margem de tolerância para valores de CSRs obtidas por espectrometria; apenas para aquelas obtidas pelo método de medição direto indicado para os laboratórios sem espectrômetro, cuja tolerância é de ± 5 %. Caso os mesmos limites fossem válidos para s CSRs obtidas por espectrometria, os próprios laboratórios primários o excederiam. A título de exemplo, para a qualidade N40, o PTB (2015) apresentou um desvio de 7 %; para a qualidade N15 o NIST (2019) apresentou um desvio também de 7 %.

No que diz respeito aos cálculos de incertezas, vale lembrar que apenas as qualidades com rastreabilidade metrológicas N60, N80, N100 e N150 poderão ser referências para calibrações futuras. As demais, por terem suas incertezas de certificados estimadas, não possuem rastreabilidade metrológica; logo não poderão ser consideradas qualidades de referências para o usuário final.

Em relação à incerteza no tempo de aquisição das cargas elétricas, optou-se pelo uso do disparador e não do cronômetro pela praticidade nas mensurações. Embora a incerteza seria menor, em torno de 0,2 %, pois o cronômetro apresenta resolução na casa de milissegundos, o ato de adquirir as medidas seria extenuante, como

foi experenciado pelo autor, uma vez que haveria necessidade de sincronismo ao parar ambos: cronômetro e eletrômetro, o que por si só geraria mais uma fonte de incerteza. A escolha foi predominantemente por questões práticas.

Na Figura 42, página 93, a dependência energética foi calculada em relação à qualidade de referência N60. A resposta energética, que é o inverso da dependência energética (ATTIX, 2004), também foi de 5%. O valor máximo encontrado de 5 % para a resposta energética está acima daquele estabelecido pelo fabricante, que é de 4 % para a faixa de 40 keV à energia do Co-60 (PTW, 2017), lembrando porém, que a curva foi levantada em termos da resposta nominal da câmara. Vale ressaltar que usualmente as curvas de respostas / dependências energéticas são feitas em relação às energias de referência do Co-60 e do Cs-137. Espera-se obter uma curva de dependência / resposta energética com incertezas menores, principalmente em relação às qualidades com filtração adicional de alumínio, quando o LABMETRO conseguir rastreabilidade metrológica para todas as qualidades do espectro estreito caracterizadas no presente trabalho.

O vale formado pelas energias 33 keV e 47 keV na Figura 42, correspondendo as qualidades N40 e N60 pode ser explicado em termos do comportamento da predominância dos efeitos fotoelétricos e Compton. O número atômico efetivo da parede da câmara de ionização<sup>3</sup> é Z= 8. A predominância do efeito fotoelétrico ocorre até aproximadamente 20 keV, quando então começa a predominar o efeito Compton, como mostrado na Figura 43, linha tracejada. Essa transição de predominância de efeitos acontece justamente nas proximidades da energia de 33 keV, qualidade N40.

Destaca-se que a seção de choque para o efeito fotoelétrico diminui com o inverso do cubo da energia, conforme equação 7, página 23. No efeito Compton a seção de choque por átomo é proporcional ao número atômico e independente da energia, como mostrado na equação 5, página 4 e na Figura 43. Nota-se que à medida que a energia aumenta, acima de aproximadamente 20 keV, a predominância do efeito Compton não muda para Z=8, porém sua probabilidade de ocorrência aumenta, já que as energias dos fótons vão ficando muito maiores do que as energias de ligação dos elétrons de valência (BUSHBERG, 2012).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Segundo o fabricante, parede da câmara revestida com 1 mm de PMMA, grafitada. Número atômico efetivo do PMMA-é 8 (NIST).

Figura 43 - Predominância do efeito fotoelétrico e Compton em função do número atômico e energia do fóton



Fonte: O AUTOR, 2020.

Após os elétrons da parede da câmara de ionização serem ejetados seja por efeito fotoelétrico ou efeito Compton, perderão energia tanto no volume sensível da câmara, que caracterizará o kerma no ar, quanto na própria parede da câmara, dependendo da sua posição de ejeção na mesma. Essa perda de energia dependerá de seus *stopping power* de colisão, como mostrado na Figura 44, região destacada na parte superior esquerda para o carbono, com Z=6, o mais próximo do material da câmara de ionização. Essa região é onde ocorre todas as interações dos fótons de raios x com a parede da câmara de ionização.

Figure 44 -Região onde ocorrem os efeitos fotoelétricos e Compton na faixa de energia das qualidades caracterizadas.



Fonte: O AUTOR, 2020.

O stopping power radiativo, considerando Z=6, não contribui para a coleta de carga, i.e., não há produção de raios x de freamento na faixa energética em questão. Apenas o *stopping power* de colisão contribui, como era de se esperar. Quanto maior o *stopping power* de colisão, mais próximo da região de predominância do efeito foto-elétrico, e quanto menor, mais próximo da região de predominância do efeito Compton.

Ressalta-se a importância das qualidades N ora caracterizadas pelo fato de serem a base para a caracterização de qualidades que permitam a calibração das grandezas operacionais contempladas na terceira parte da norma ISO 4037: *calibração de dosímetros de área e pessoal e medidas de suas respostas como função da energia e ângulo de incidência.* 

#### 4.1 Limitação da câmara de ionização e incertezas entre N10 e N30.

Importante ressaltar que a câmara de ionização tomada como referência no LABMETRO é limitada a energia mínima de 30 keV. Porém, a menor energia estabelecida pela ISO 4037-1 é são 8 keV, referente a qualidade N10. Tal fato por si só pode ter influência no levantamento da dependência energética apresentado na Figura 42, p. 92. Necessário medições futuras com câmaras que apresentem uma respostas para energias mais baixas, como por exemplo a câmara dedicada a qualidades de mamografia Radcal 10x5-6M, cuja resposta mínima são de 10 keV (RADCAL, 2020).

Em função da limitação da câmara de ionização elencada acima, as incertezas calculadas para energias abaixo de 30 keV também podem sofrer alterações significativas em seus valores. Por isso, a melhor opção, mesmo que tais incertezas sejam levantadas com uma câmara de ionização adequada, seria a obtenção da rastreabilidade metrológica.

#### CONCLUSÃO

Embora as energias médias espectrais para as qualidades N120 e N150 sejam menores do que as apresentadas na literatura e no laboratório de referência PTB (2015), apresentaram uma variação de 3 %, menor do que a preconizada pela norma que é de 5 %.

As qualidades N120 e N150 apresentaram variação de resolução espectral de 11 %, e 19 %, respectivamente, acima do valor recomendado pela norma que é de 10 %. Porém, para efeitos práticos durante as futuras calibrações, a energia média espectral será o fator mais importante, já que as respostas dos detectores são em energia e não em resolução espectral.

A dependência energética da câmara de ionização em relação à qualidade N60 foi de 5 % para todas as qualidades, excetuando-se a qualidade N40, que não apresentou dependência energética. Ressalta-se, porém, que tais dependências foram obtidas através da resposta nominal da câmara, dada pelo fabricante através do fator de conversão  $10^6 Gy/C$ .

As componentes de incerteza que mais contribuíram foram aquelas referentes à coleta de carga elétrica, tempo de exposição e estabilidade de câmara de ionização.

Os resultados da caracterização das qualidades referentes à série de espectros estreitos N para radioproteção, preconizados pela norma brasileira ABNT NBR ISO 4037-1: 2015, foram satisfatórios, dadas as concordâncias dos resultados com os resultados de laboratórios de referência e literatura, além daqueles preconizadas pela norma.

O oferecimento da rastreabilidade em todas as qualidades N por parte do LNMRI seria a solução mais viável, tanto economicamente quanto logisticamente, pois não haveria a necessidade de enviar um conjunto dosimétrico para um laboratório primário internacional.

Os próximos desafios serão a operacionalização dos procedimentos de calibrações a serem desenvolvidos para as qualidades hoje com rastreabilidade metrológica, N60, N80, N100 e N150, e a caracterização dos feixes para as grandezas operacionais de monitoração de área e pessoal contempladas na terceira parte da norma ISO 4037.

## REFERÊNCIAS

A. HERRATI, M. A. T. S. K. K.-K. Establishment of ISO 4037-1 X-Ray Narrow-Spectrum Series At SSDL of Algiers. **Radiation Protection Dosimetry**, p. 1-18, 2016.

ATTIX, F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. [S.I.]: WILEY- VCH, 2004. 668 p.

BUSHBERG, J. T. J. A. L. J. E. M. B. J. M. **The Essential Physics of Medical Imaging**. Philadelphia: LWW, 2012.

BUSHONG, S. C. **Ciência radiológica para tecnólogos**. São Paulo: Elsevier, 2010. BUSHONG, S. C. **Radiologic Science for Technologisits:** Physics, Biology and Protection. Décima primeira. ed. Texas: Elsevier, 2017. 688 p.

CENTER FOR X- RAY OPTICS AND ADVANCED LIGHT SOURCES. X-Ray Data Booklet. 3. ed. Berkeley: [s.n.], 2009.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e Estatística**. 2<sup>a</sup>. ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003. 116 p.

CORREIA, A. R. Determinação de probabilidade de emissão de raios x característicos e gama com detecotor de CdTe. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 86. 2016.

D.L. BAILEY, J. L. H. A. T.-P. A. V. A. **Nuclea Medicine Physics:** A Handbook for Teachers and Students. Viena: IEAE, 2014.

DANA KURKOVÁ, L. J. X-ray tube spectra measurement and correction using a CdTe detector and an analytic response matrix for photon energies up to 160 keV. **Radiation Measurements**, v. 85, p. 64-72, 2016.

DANIEL, W. W.; CROSS, C. L. **Biostatistics:** a foundation for analysis in the health sciences. Décima. ed. [S.I.]: Wiley, 2013.

DELIANG ZHANG, W. L. I. W. H. D. R. Z. S. F. Establishment of ISO 4037-1 X-ray narrowspectrum series spectrum series. **The Journal of Engineering : 7th International Symposium on Test Automation and Instrumentation**, v. 2019, p. 8858-8861, 2018.

GONZALES, A. H. L. S. J. C. C. P. R. Determinação dos Coeficientes de Conversão Médios entre Kerma noAr e H\*(10) usando Feixes de Raios X Primários, Secundários e Transmitidos na Faixa de Energia da Radiologia Diagnóstica. **Revista Brasileira de Física Médica**, p. 16-20, 2016.

HOLMBERG, O. C. R. M. F. The importance and unique aspects of radiation protection in medicine. **European Journal of Radiology**, p. 6-10, 2010.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia:** Conceitos fundamentais e gerais e termos. Duque de Caxias: [s.n.], 2012a. 94 p.

INMETRO/CICMA/SEPIN. Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição –GUM2012, Duque de Caxias, p. 141, 2012b.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety reports series N16 - Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. Vienna: [s.n.], 2000.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **TRS-398:** Absorbed Dose Determination in external Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water. Vienna: IAEA, 2000.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **TRS-457:** Dosimetry in Diagnostic Radiology: An Internation Code of Pratice. Vienna: [s.n.], 2007.

JONAS, T. Calculation of conversion coefficients from air-kerma to dose-equivalent for ISO N and ISO H x-ray qualities and modeling of Orctec GEM-S5020P spectrometer. **STUK-TR 30**, Helsinki, Maio 2019.

JOSILENE C. SANTOS, A. H. L. G. A. T. P. R. C. Determinação da camada semirredutora e da tensão aplicada a partir de espectros emitidos por um tubo de raios X. **Revista Brasileira de Física Médica**, p. 28-33, 2016.

KAZMIER, L. J. Business Statistics - Schaum's Easy Outline. [S.I.]: [s.n.], 2013. KNOLL, G. F. Radiation detection and measurement. 4<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2010. 864 p.

KOTZ SAMUEL, V. D. J. R. **Beyond Beta:** Other Continuous Families Of Distributions With Bounded Support And Applications. Singapura: World Scientific, 2004.

LAITANO, T. P. P. Energy distributions and air kerma rates of ISO and BIPM reference filtered X-radiations. Italy: [s.n.], 1990. 70 p.

LARSSON, Y. Establishing low-energy x-ray fields and determining operational dose equivalent conversion coefficients. Stockholm University. Stockhom, p. 60. 2008.

LEWIS, V. et al. **Measurament Good Practice Guide No. 49:** The Assessment of Uncertainty in Radiological Calibration and Testing. Teddington: [s.n.], 2005.

MACEDO, E. M. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DOS EQUIPAMENTOS MEDIDORES DE RADIAÇÃO UTILIZADOS EM LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM MAMOGRAFIA NO BRASIL. IRD. Rio de Janeiro, p. 112. 2020.

MATTEUCCI, C.; DINIS, A. C.; GUIMARÃES, K. L. Cálculo e avaliação da incerteza estimada de medição de ensaios de análise de tamanho de partículas por espalhamento dinâmico de luz (DLS). **IPT - Tecnologia e Informação**, v. 1, Agosto 2017.

METTLER, M. B.-C. C. E. F. R. M. S. A. B. G. V. Patient Exposure from Radiologic and Nuclear Medicine Procedures in the United States: Procedure Volume and Effective Dose for the Period 2006–2016. **Radiology**, p. 1-10, 17 março 2020.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. DATASUS-Tecnologia da Informação a Serviço do SUS. **Tabnet**, 2020. Disponivel em:

<a href="http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?cnes/cnv/equipobr.def">http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?cnes/cnv/equipobr.def</a>>. Acesso em: 20 agosto 2019.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Física das Radiações. São Paulo: Oficine de Textos, 2010. 296 p.

SIMON R. CHERRY, J. A. S. M. E. P. **Physics in Nuclear Medicine**. 4. ed. [S.I.]: Saunders, 2012. 544 p.

TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria:** Fundamentos. agosto: IRD/CNEN, 2003. 242 p.

TERO TAPIOVAARA, M. T. E. S. A. H. The spectra of the standard x-ray qualities used in STUK's Radiation Metrology Laboratory. Helsinki. 2008.

TOMAL, S. C. L. G. P. Monte Carlo simulation of the response functions of CdTe detectors to be applied in x-ray spectroscopy. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 100, p. 32-37, 2015.

TSOULFANIDIS, N. **Measurement and Detection of Radiation**. Washington: Taylor & Francis, 1995.

VERONIKA R, M. Measurement uncertainty. **Journal of Chromatography A**, 1 march 2007. 15-24.

VIALI, L. O grau de liberdade ou será que isto tem a ver com birita? **http:** //www.pucrs.br/ciencias/viali/. Disponivel em: <http://www.pucrs.br/ciencias/viali/publicacoes/outras/contro\_09.htm>. Acesso em: 26 out. 2019.

ZAR, J. H. **Biostatiscal Analysis**. 5<sup>a</sup>. ed. [S.I.]: Pearson, 2010.

## **ANEXO A -** TABELA T-STUDENT

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

Tabela 14 - Tabela da distribuição t-student.

FONTE: ISO GUM, 2008

#### ANEXO B - Certificado de Calibração da Câmara de Ionização

Comissão Nacional de Energia Nuclear ĨRD Instituto de Radioproteção e Dosimetria Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes Certificado de Calibração Número do Certificado: LNMRI 0648/2019 Calibration Certificate Certificate Number Solicitante do Serviço Nome: UERJ - Laboratório de Ciências Radiológicas Name Endereço: R. São Francisco Xavier, 524 - Pav. Haroldo Lisboa da Cunha sala 136, Maracanã CEP, Rio de Janeiro, RJ Adress Identificação do Instrumento Instrumento: Eletrômetro Detector: Câmara de Ionização Inst Fabricante: Keithley Fabricante: PTW Manufacturer Manufacturer Modelo/Tipo: 6517B Modelo/Tipo: TK-30 Model/Type Model/Type Número de Série: 4066441 Número de Série: 292 Serial Number Serial Number Informações administrativas Ordem de serviço IRD: 1171/2019 Data da Calibração: 10/09/2019 IRD Register Calibration Date Laboratório Responsável pela Calibração: LNMRI - DOSIM - Raios X YXLON Laboratory Responsible for the Calibration 02/10/2019 Paulo Henrique Gonçalves Rosado Responsável Técnico pelo Lab Data Emissão Certificado issued on Paulo Henrique G. Rosado DIMET/IRD Mat: 00409-3

Instituição Designada pelo INMETRO Integrante da Rede de Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário da AIEA/OMS Centro de Colaboração da Organização Mundial de Saúde para Dosimetria das Radiações

Estes resultados referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas no texto deste Certificado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos e a reprodução deste Certificado só é permitida na sua totalidade.

> IRD - Av. Salvador Allende, Bara da Tijuca, Rio de Janeiro - RJ - Brasil - CEP. 22783-127 LNMRI - Tel.: (021) 2173-2862 Fax: (021) 2173-2863, e-Mail: cliente@ird.gov.br

Página 1/3

## Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

### Certificado de Calibração

Calibration Certificate

Número do Certificado: LNMRI 0648/2019 Certificate Number

#### SISTEMAS PADRÃO SECUNDÁRIOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

Câmara de ionização de 11, modelo PTW32002, número de série 490, fabricada pela NE Technology (UK), e calibrada em 2018 no Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Alemanha, acoplada a um eletrômetro keithley, modelo 6517B e número de série 4017702, calibrado por Keithley Instruments Inc. em 2013.

#### Resultados e Declaração de Incertezas

Results and Uncertainties

Quando for necessário o uso de cabos de extensão para conectar a câmara de ionização ao eletrômetro, são usados os pertencentes ao LNMRI. Os valores obtidos no teste de corrente de fuga do sistema de medida não ultrapassaram o limite máximo de ± 0,5% da corrente produzida pela menor taxa de exposição utilizada na calibração.

Os resultados apresentados neste certificado foram obtidos com o eletrômetro na escala de 300V

Durante a calibração do sistema de medida nos feixes de radiação, a câmara foi posicionada com seu eixo longitudinal perpendicular ao eixo central do feixe, com o traço indicado na haste, ou na falta deste, o nº de série voltado para a direção de origem do feixe, a uma distância foco detetor de 2,5 metros. O ponto da câmara usado como referência para medida localiza-se no centro geométrico da câmara. A calibração foi efetuada utilizando o método de substuição.

A incerteza expandida (U) de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k = 2,00, o qual, na distribuição normal a probabilidade de abrangencia corresponde a aproximadamente 95%.

Para as qualidades nas quais o sistema de medida foi calibrado, a tabela I indica os coeficientes que devem ser multiplicados pela corrente de ionização medida pelo conjunto câmara/eletrometro, a fim de se obter a taxa de kerma no ar quando a temperatura ambiente for igual a 20 Celsius, a pressão atmosférica for de 101,325 kPa e a umidade relativa do ar for de 50%. Nenhuma correção foi aplicada na medida da corrente de ionização para a incompleta coleta de carga devido à recombinação iônica, nem para o efeito de polaridade.

Se as condições ambientais durante o uso da câmara de ionização forem diferentes das condições especificadas no item anterior, devem ser utilizadas correções para a densidade do ar no interior do volume sensível de medida da câmara segundo a lei dos gases perfeitos ou segundo a especificação do fabricante do sistema de medida. Quando a umidade relativa do ar estiver entre 20% e 70% e a temperatura ambiente estiver entre 15 e 25 Celsius nenhuma correção para umidade necessita ser feita. Fora desses límites, a utilização da câmara poderá implicar em perda de exatidão em sua resposta.

Coeficientes de calibração do sistema de Medida								
Qualidade de Radiação	Filtração (mm)	Taxa de Kerma no Ar(Gy/min)	N <sub>k</sub> (Gy/C)*Kq	Incerteza (%)				
N60	4,0 Al + 0,6 Cu	1,78E-04	9,071E+05	2,6				
N80	4,0 Al + 2,0 Cu	3,87E-05	8,988E+05	2.6				
N100	4,0 AI + 5,0 Cu	2,58E-05	9,115E+05	2.6				
N150	4,0 Al + 2,5 Sn	1,78E-04	9,071E+05	2,6				
W110	4,0 AI + 2,0 Cu	3,79E-04	9,068E+05	2.6				

Tabela 1

onizantes

# Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

Certificado de Calibração Calibration Certificate

Número do Certificado: LNMRI 0648/2019 Certificate Number

No caso de ocorrência de quaisquer danos ou alterações que possam modificar o valor do coeficiente de calibração

aulo H. C. house Paulo Henrique G. Rosado DIMET/IRD Mat: 00409-3 Calibração executada por:

Paulo Henrique Gonçalves Rosado

FP02A-029 Rev. 01