AUTARQUIA ASSOCIADA À
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTOCOLO DE CALIBRAÇÃO UTILIZANDO ESPECTROMETRIA E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA, EM FEIXES PADRÕES DE RAIOS X

LUCAS RODRIGUES DOS SANTOS

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear – Aplicações.

Orientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Maria da Penha Albuquerque
Potiens

SÃO PAULO
2017

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTOCOLO DE CALIBRAÇÃO UTILIZANDO
ESPECTROMETRIA E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA, EM FEIXES PADRÕES DE RAIOS X**

LUCAS RODRIGUES DOS SANTOS

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Maria da Penha Albuquerque
Potiens**

Versão Corrigida

**São Paulo
2017**

DEDICATÓRIA

*A todos que me proporcionaram
bons momentos, me confortaram,
foram amigos e companheiros.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas oportunidades colocadas estrategicamente em minha vida, algumas aproveitadas e outras que serviram de lição.

Ao IPEN pelo apoio financeiro e de infra-estrutura para a realização deste trabalho.

Ao IFSP por ter sido lá que realizei o sonho de ser professor e por ter me incentivado durante todo tempo para a conclusão deste trabalho, com apoio financeiro e no afastamento para a qualificação.

Ao CNPq pelo fomento inicial que possibilitou a aquisição de instrumentos indispensáveis a este trabalho.

À Dr^a Maria da Penha e ao Dr. Vitor Vivolo pelos ensinamentos e paciência nesses quatro anos de doutorado.

Aos doutores William de Souza Santos e Maurício Moralles, pelas valiosas contribuições na parte de simulação pelo método de Monte Carlo

Ao IFBA, pela confiança na parceria, IFBA/IPEN, firmado sob a responsabilidade do Dr. Marcus Navarro, a quem também tenho muito a agradecer.

Ao Dr. Paulo Roberto do Instituto de Física da USP, por ter aberto o laboratório sob sua responsabilidade para que eu pudesse conhecer a metodologia de trabalho deles e criar adaptações para o LCI/IPEN.

À toda equipe do GMR/IPEN, amigos que com certeza marcaram minha vida nesses 8 anos de convivência e gostaria que ficassem nela. Em especial a Marcos Xavier, Joaquim Sanches, Claudinei Cescon, Aldo, Raphael Diniz, Ana Maria (mainha), Teresa, Gelson, e tantos outros que participaram deste tempo de convivência.

Aos amigos do Crusp, do IFSP, do IPEN, da UFS e da vida que me estimularam e ouviram minhas lamentações, mas também provocaram muitas risadas.

À Kátia Kristina, mulher especial que trouxe alegria à minha vida.

E por último, mas não menos importante, agradeço à minha família que sempre me apoiou desde o início da minha jornada. Saibam que sem o apoio de vocês, chegar tão longe, seria muito difícil.

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTOCOLO DE CALIBRAÇÃO UTILIZANDO ESPECTROMETRIA E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA, EM FEIXES PADRÕES DE RAIOS X

LUCAS RODRIGUES DOS SANTOS

RESUMO

A calibração, por definição, é o processo pelo qual se estabelece uma relação entre valores de medição de um padrão, com as suas respectivas incertezas, e as indicações com as incertezas associadas do instrumento de medição a ser calibrado. Um protocolo de calibração descreve a metodologia a ser aplicada em um processo de calibração. O método escolhido para a obtenção deste protocolo foi o da espectrometria de feixe de raios X associada à simulação pelo método de Monte Carlo, fundamentado no fato de que ambos são considerados métodos absolutos na determinação de parâmetros de feixes de radiação. Neste trabalho foi utilizado o método de Monte Carlo utilizado para obter a função resposta do detector utilizada para a correção dos espectros obtidos do feixe primário de radiação X; deste modo foram calculadas as taxas de kerma destes feixes e comparadas aos valores obtidos com as câmaras de ionização padrão secundário do Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN (LCI/IPEN). Foram obtidos os coeficientes de calibração para o sistema padrão com diferenças em relação ao fornecido pelo laboratório primário entre 1,3% e 15,3%. Os resultados obtidos indicaram a viabilidade do estabelecimento deste protocolo de calibração utilizando a espectrometria como padrão de referência, com incertezas relativas de 0,62% para $k=1$. As incertezas associadas ao método proposto foram satisfatórias, para um laboratório padrão secundário e comparáveis a um laboratório primário.

DEVELOPMENT OF A CALIBRATION PROTOCOL USING SPECTROMETRY AND MATHEMATICAL SIMULATION, IN X RAY STANDARD BEAMS

LUCAS RODRIGUES DOS SANTOS

ABSTRACT

Calibration, by definition, is the process that establishes a relation between the measurement values of a standard, with their respective uncertainties, and the indications with the associated uncertainties of an instrument to be calibrated. A calibration protocol describes the methodology to be applied during the calibration process. The chosen method to obtain this protocol was the use of the X-ray beam spectrometry associated with Monte Carlo mathematical simulation, based on the fact that both are considered primary methods for x radiation beams parameters determination. The work consists in obtaining the detector response function using the Monte Carlo method for the correction of the X radiation primary beam spectra obtained. After that, the kerma rates values were calculated and compared to those obtained with the secondary standard ionization chambers of the Calibration Laboratory of IPEN. The calibration coefficients for the standard ionization chambers were found with differences from that provided by the primary laboratory between 1.3% and 15.31%. The results indicated the feasibility of establishing a protocol for the calibration of instruments using spectrometry as a reference standard, with relative uncertainties of 0.62% for $k = 1$. The uncertainties associated with the proposed method were satisfactory for a secondary standard laboratory and comparable to a primary laboratory.

SUMÁRIO

	PÁGINA
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Revisão bibliográfica.....	12
1.1.1 Protocolos de calibração	12
1.1.2 Espectrometria	14
1.1.3 Simulação pelo método de Monte Carlo	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Geral.....	16
2.2 Específicos	16
2.3 Relevância e originalidade.....	17
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
3.1 Fontes de radiação eletromagnética.....	18
3.1.1 Radiação de freamento (<i>Bremsstrahlung</i>).....	18
3.1.2 Raios X característicos.....	20
3.2 Interação da radiação com a matéria	21
3.2.1 Efeito fotoelétrico	22
3.2.2 Espalhamento elástico	23
3.2.3 Efeito Compton	23
3.3 Espectro de raios X	24
3.3.1 Caracterização da qualidade do espectro de raios X	25
3.3.2 Material do alvo	26
3.3.3 Tensão de pico, kVp	26
3.3.4 Energia Média, E	27
3.3.5 Camada semirredutora, CSR	27
3.4 Grandezas e unidades.....	28
3.4.1 Exposição, X	28
3.4.2 Kerma, K	28
3.4.3 Fluência de partículas, Φ	29
3.4.4 Dose absorvida, D.....	29
3.5 Detectores	29
3.5.1 Câmara de ionização	29
3.5.2 Detectores semicondutores.....	31
3.6 Calibração de instrumentos	34
3.7 Simulação pelo método de Monte Carlo	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 Sistema de raios X.....	39

4.2	Sistemas de detecção	41
4.3	Espectrometria.....	45
4.3.1	Posicionamento dos espectrômetros	45
4.3.2	Aplicabilidade dos detectores.....	46
4.3.3	Calibração em energia do detector	47
4.3.4	Medição dos espectros	49
4.4	Determinação da tensão de pico (kVp).....	51
4.5	Simulação pelo método de Monte Carlo	51
4.6	Correção dos espectros.....	54
4.7	Cálculo da taxa de kerma no ar	55
4.8	Validação da metodologia.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	Posicionamento dos espectrômetros.....	58
5.2	Aplicabilidade dos detectores	60
5.3	Calibração em energia do CdTe	66
5.4	Medição dos espectros	69
5.4.1	Obtenção da tensão de pico utilizando espectrometria.....	69
5.4.2	Medição dos espectros primários para cálculo do kerma.....	76
5.5	Simulação pelo método de Monte Carlo	83
5.6	Correção dos espectros.....	86
5.7	Cálculo das taxas de kerma utilizando a espectrometria	93
5.8	Validação da metodologia.....	97
6	CONCLUSÕES.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

A norma CNEN-NN-3.01 “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica” (CNEN, 2014), estabelece aos serviços de proteção radiológica que a calibração periódica de equipamentos utilizados em medições de feixes e fontes de radiação ionizante seja rastreada a um laboratório padrão de dosimetria reconhecido ou autorizado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), seguindo as diretrizes do Comitê de Avaliação de Serviços de Ensaio e Calibração (CASEC/IRD/CNEN, 2011). Além disso, as normas da CNEN, que tratam de radioproteção, estabelecem o que os instrumentos utilizados sejam adequados e calibrados para faixa de operação nas instalações nucleares, radiativas e em serviços que utilizam material radioativo (CNEN, 1998, 2014). Corroborando com estas, a Portaria nº 453 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (MS, 1998) estabelece que os instrumentos utilizados para medições de níveis de radiação devem ser calibrados a cada dois anos, em laboratórios credenciados e com rastreabilidade à rede nacional ou internacional de metrologia das radiações ionizantes, nas qualidades de feixes de raios X diagnóstico.

No Brasil, foi criado pelo Decreto nº 6.259, de 20 de novembro de 2007, o Sistema Brasileiro de Tecnologia (SIBRATEC) com o objetivo de funcionar como uma ferramenta para aproximar e articular a relação entre empresas e instituições científicas e técnicas (ICT), que podem ser universidades ou institutos de pesquisa. As ICT's formam redes laboratoriais que podem atuar em três vertentes; extensão tecnológica, centros de inovação e serviços tecnológicos.

Dentro das redes de serviços tecnológicos encontra-se a rede de serviços tecnológicos em radioproteção e dosimetria (Rede Metroradi), da qual o Laboratório de Calibração de Instrumentos, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI/IPEN) é um dos participantes junto com os 23 outros laboratórios apresentados na FIG. 1.1.

FIGURA 1.1 – Distribuição geográfica dos laboratórios participantes da Rede Metroradi. Retirado de METRORADI (2007).

São realizadas, no LCI/IPEN, por ano, em torno de 1000 calibrações de instrumentos (monitores e dosímetros) utilizados para medições dos níveis de radiação ionizante, além de irradiações de amostras e dosímetros pessoais. Dentre estes, 20% aproximadamente são dosímetros utilizados em procedimentos de radiodiagnóstico, tanto para levantamentos radiométricos quanto para dosimetria de feixe, enquadrando-se nas exigências da ANVISA (MS, 1998).

O LCI/IPEN é reconhecido como laboratório autorizado para o serviço de calibração de instrumentos de medição para radiação ionizante pela CNEN. Possui sistemas dosimétricos de referência padrão secundário, ou seja, seus instrumentos de medição são rastreáveis a um padrão primário de medição. Logo, é necessária a calibração dos dosímetros que são utilizados como padrões do LCI/IPEN em laboratórios reconhecidos como primários na rede metrológica. No Brasil, não há

laboratório primário para este tipo de grandeza; o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (LNMRI/IRD), também é submetido à rastreabilidade dos laboratórios primários internacionais. Então, os equipamentos padrão do LCI/IPEN participam de comparações laboratoriais periódicas organizadas pelo LNMRI/IRD. Os instrumentos de referência do LCI/IPEN calibrados pelo LNMRI passam a ter padronização terciária. Na FIG.1.2 é apresentada a hierarquia da rede metrológica brasileira.

FIGURA 1.2 - Hierarquia da rede metrológica brasileira. Adaptado de INMETRO (2014).

As calibrações dos padrões do LCI/IPEN em um laboratório primário internacional requerem muito trabalho com os trâmites burocráticos. Segundo relato dos responsáveis técnicos do laboratório, o processo de preparação dos documentos necessários para que o laboratório primário, *Physikalisch Technische Bundesanstalt* (PTB), da Alemanha, aceitasse os equipamentos para a última calibração realizada, foi de aproximadamente seis meses, isso sem considerar o envio ou a disponibilidade de alguém para transportar o equipamento até o PTB, onerando financeiramente o IPEN.

Devido à impossibilidade de realizar a calibração no LNMRI/IRD, sem que o grau de rastreabilidade metrológica do LCI/IPEN diminua, e ao alto custo para realização das calibrações em laboratórios primários internacionais, surgiu a ideia de se ter um protocolo de calibração no LCI/IPEN que seja comparável ao de um laboratório primário. O método escolhido para a obtenção deste protocolo foi o da espectrometria de feixe de raios X associada à simulação pelo método de Monte Carlo, fundamentado no fato de que ambos são considerados métodos absolutos de determinação de parâmetros de um feixe de radiação. Além disso, o LCI possui um Sistema de Gestão da Qualidade implantado desde o ano de 2002, baseado nos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 (ISO, 2005). O cumprimento dos requisitos desta norma também é uma exigência da Rede Metroradi. De acordo com esta norma o laboratório deve ter um programa de calibração de seus padrões de referência de forma que assegure que as calibrações e medições feitas pelo laboratório sejam rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

A justificativa para este trabalho ser realizado no LCI/IPEN baseia-se na possibilidade de ter um protocolo de calibração comparável a um sistema primário, que possibilite a diminuição das incertezas envolvidas no uso de um sistema padrão além de uma alteração na frequência do envio dos padrões para a calibração em outros laboratórios, agregando uma melhora à confiabilidade metrológica das calibrações e reduzindo os custos de operação do laboratório. Para a manutenção da confiança na situação da calibração dos padrões de referência, um programa de verificações intermediárias deve ser realizado de acordo com procedimentos e cronograma definidos (ISO, 2005).

Os pesquisadores do LCI/IPEN historicamente têm se dedicado, em seus projetos de pesquisa, a estudos que possibilitem a caracterização primária dos feixes de radiação empregados em seus sistemas. Trabalhos como NEVES (2013); ANTONIO (2014); ALVARENGA (2014); LIMA (2014), SILVA (2016), entre outros, comprovam o compromisso do LCI/IPEN com a melhoria da confiabilidade metrológica.

1.1 Revisão bibliográfica

1.1.1 Protocolos de calibração

Para que exerçam suas atividades de competência, os laboratórios de calibração de instrumentos elaboram protocolos baseados em normas, relatórios técnicos, recomendações de órgãos superiores e artigos científicos. Um protocolo de calibração é um conjunto de normas e procedimentos com o objetivo de assegurar que as medições de calibração sejam realizadas sempre da mesma maneira. Dentre as principais referências utilizadas pelo LCI/IPEN, destacam-se os seguintes documentos, CASEC/IRD/CNEN (2011); ISO (1996); IEC (2005); IAEA (2000, 2007); estes são detalhados um pouco melhor a seguir.

O documento RT-LCI-001/2011 (CASEC/IRD/CNEN, 2011) é o único documento nacional que traz os requisitos técnicos para a certificação de laboratório de calibração de instrumentos de medição para radiações ionizantes usados em radioproteção, indicando os procedimentos para elaboração de protocolos e determinando as exigências mínimas para calibração de instrumentos na área. Tais protocolos devem ser submetidos a avaliações realizadas pelo CASEC/IRD (CASEC/IRD/CNEN, 2011). O cumprimento destes requisitos assegura que o laboratório está capacitado a apresentar alto padrão de desempenho na calibração de instrumentos para uso em diferentes campos de radiação.

Na área de radioproteção, um grupo de publicações da norma ISO 4037 (série 1, 2, 3 e 4), publicados a partir de 1996, são os principais documentos que estabelecem procedimentos para caracterização dos feixes de radiação para a calibração e também as principais características de desempenho dos instrumentos de referência para o estabelecimento de um laboratório de calibração de instrumentos (ISO, 1996). Nela, constam os valores de referência para homogeneidade, filtração inerente e adicional do feixe e os espectros de referência para cada qualidade de radiação de feixe estreito (ISO, 1996).

Para radiodiagnóstico, somente em 2005 foi publicada a primeira norma internacional (IEC 61267) que parametriza as especificações dos equipamentos necessárias à calibração, caracterizando qualidades de radiação específicas para esta aplicação. Esta norma detalha várias qualidades de radiação ("*Radiation Qualities*"), que podem ser aplicadas para testes e medições em radiologia convencional, feixe atenuado ou feixe direto (RQA's e RQR's); mamografia (RQR-M's e RQA-M's), e tomografia computadorizada (RQT's) (IEC, 2005).

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) em conjunto com a Organização Mundial da Saúde (WHO), criou em 1976 e coordena até os dias de hoje, a rede de Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário (IAEA/WHO *network of SSDLs*) com o intuito de disseminar as calibrações para os usuários de instrumentos medidores de radiação e servir como um *link* até os padrões primários. Esta rede tem a responsabilidade de garantir que os serviços oferecidos pelos laboratórios de calibração sigam padrões metrológicos aceitos internacionalmente. Desde a sua fundação a IAEA iniciou um programa de dosimetria das radiações ionizantes, ajudando os países membros a desenvolver uma capacidade metrológica necessária para a aplicação da radiação na medicina, proteção radiológica, indústria e outros. Desta forma, vem disseminando padrões e diretrizes para a medição das radiações por meio de publicações de códigos de prática, protocolos e guias direcionados aos laboratórios de calibração.

Para a implantação das qualidades de radiação no LCI/IPEN e que são objetos deste trabalho, foram utilizadas como referência duas publicações da IAEA, uma específica para radiodiagnóstico, TRS 457, e uma para radioproteção, SRS 16. Ambas versam sobre a padronização dos procedimentos de calibração de instrumentos; tipos de detectores a serem utilizados; posicionamento, tolerâncias para controle de qualidade dos equipamentos; procedimentos para cálculo de correções de medições e cálculo para obtenção dos coeficientes de calibração (IAEA, 2000; 2007).

1.1.2 Espectrometria

Segundo a norma IEC 61267, o modo mais completo de especificar qualidades de campos de radiação X é por meio da distribuição espectral da fluência de fótons. Devido às dificuldades no tratamento dos dados obtidos por espectrometria, recomenda-se seu emprego apenas para a averiguação da tensão do tubo (IEC, 2005).

Abbene *et al.* (2007, 2012) apresentam resultados que envolvem espectrometria direta de feixes de raios X, com taxas altas, utilizando um espectrômetro semicondutor de CdTe associado ao processamento digital de pulso (DPP). Esses trabalhos são os principais motivadores para este estudo, pois a forma como era feita a espectrometria no LCI/IPEN (POTIENS, 1999) e (LUCENA, 2010) impedia que condições reais de irradiação, distância e intensidade do feixe, fossem adotadas na calibração, devido à maior sensibilidade e maior tempo de processamento do detector de germânio hiperpuro (HPGe) que ocasionam empilhamento de contagens no espectro e aumento do tempo morto de processamento do detector, respectivamente.

Abbene (2013a, 2013b) abordam o processamento digital de pulso, relacionando-o com características dos sistemas de detecção, resolução em energia e tempo de processamento de pulso.

O uso de um sistema de medição compatível com taxas altas de radiação, determinando grandezas dosimétricas (kerma no ar) a partir da espectrometria de raios X (ANKERHOLD *et al.*, 1999), possibilitaria a obtenção de um coeficiente de calibração gerado a partir das medições dos espectros, configurando um método comparável ao primário.

Alguns estudos na área, como o de Almeida Junior *et al.* (2010) e Mainardi e Bonzi (2008), relataram dificuldades do tratamento de dados de espectros medidos indiretamente, com o uso de métodos de medição de espectros espalhados (efeito Compton) com diferentes objetos espalhadores entre si. O primeiro estudo utilizou polimetilmetacrilato (PMMA), e o segundo, disco de carbono.

1.1.3 Simulação pelo método de Monte Carlo

Para sanar os problemas relatados com o tratamento dos dados obtidos utilizando a espectrometria emprega-se a simulação pelo método de Monte Carlo com método de Monte Carlo, devido principalmente às dificuldades de se obter experimentalmente as reconstruções dos espectros obtidos.

Realizar estimativas que se respaldem na produção e transporte da radiação em um determinado material é relativamente simples, em tese, com a condição de que as interações da radiação com a matéria sejam bem entendidas e que haja dados suficientes da seção de choque para estas interações para o referido material. Entretanto, a maioria dos detectores de radiação possui grande complexidade na sua geometria e apresentam diferentes materiais em sua composição. Logo, para realizar os cálculos das interações que ocorrem no processo de detecção, o método Monte Carlo é recomendado, pois a precisão é diretamente relacionada ao tempo de processamento dos dados (MORALLES *et al.*, 2002).

Representando um dos maiores usos da simulação pelo método de Monte Carlo está a obtenção da função resposta do detector, que representa o comportamento do detector a fótons monoenergéticos, devido às distorções espectrais ocasionadas pela eficiência inerente do detector, o escape da radiação secundária, a coleta incompleta de cargas e os efeitos de captura (TOMAL *et al.*, 2015).

Vários trabalhos foram desenvolvidos com a utilização da simulação pelo método de Monte Carlo para a obtenção da função resposta do detector, dentre os de maior relevância para este estudo estão os de Morales *et al.*, (2007), Abbene *et al.* (2012), Tomal *et al.* (2015), Ankerhold *et al.* (1999).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver e validar um protocolo de calibração em feixes padrões de radiação X, utilizando espectrometria associada à simulação matemática (método de Monte Carlo), que possa garantir uma qualidade metrológica comparável a um padrão primário.

2.2 Específicos

Como objetivos específicos este trabalho apresenta:

- Comparar as principais características dos detectores disponíveis para a espectrometria;
- Desenvolver um arranjo específico para o posicionamento dos detectores no feixe de radiação;
- Determinar os parâmetros de calibração e resposta dos detectores para a espectrometria no intervalo de energia de interesse;
- Obter a função resposta do detector por meio da simulação pelo método de Monte Carlo;
- Realizar a espectrometria dos feixes de radiação X nas mesmas condições de irradiação utilizadas na calibração;
- Obter os parâmetros que caracterizam o feixe de radiação, incluindo suas incertezas, utilizando a espectrometria como referência, para o controle de qualidade do LCI/IPEN, e
- Obter coeficientes de calibração do sistema de referência equiparáveis a um sistema primário de calibração pela metodologia desenvolvida.

2.3 Relevância e originalidade

A determinação do coeficiente de calibração, com o acompanhamento do controle de qualidade dos parâmetros do feixe de radiação emitido pelo equipamento, denota um compromisso muito importante entre a rastreabilidade metrológica e o programa de garantia de qualidade.

Este estudo será um dos primeiros no Brasil em que se propõe a caracterização do feixe, juntamente com a obtenção dos parâmetros dosimétricos necessários à calibração. É o primeiro a utilizar um sistema de aquisição digital para realizar a calibração por espectrometria nas mesmas condições de irradiação do instrumento sob calibração.

A completa caracterização de feixes de radiação X é dada pela sua distribuição espectral. No entanto, a espectrometria requer conhecimentos específicos consideráveis e demanda um longo tempo de preparo para a aquisição das contagens. Por esta razão, as recomendações internacionais da *International Electrotechnical Commission* (IEC, 2005) e da *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 2007) sugerem a utilização apenas de parâmetros em termos de tensão do tubo e camada semirredutora (CSR), comprovando o pioneirismo do estudo que tem a intenção de ampliar o uso da espectrometria no controle de qualidade e na rotina de calibração.

Configura a originalidade deste estudo o uso de um método de calibração associado à determinação dos parâmetros de caracterização do feixe utilizando duas ferramentas consideradas primárias (espectrometria e simulação pelo método de Monte Carlo).

A simulação pelo método de Monte Carlo permitirá, após a sua validação, determinar parâmetros de calibração comparáveis a um sistema primário de detecção, melhorando a confiabilidade metrológica, por meio da redução de grandezas de influência das incertezas de medição.

Adicionalmente, a capacidade de fornecer os parâmetros de controle de qualidade do equipamento de raios X, no momento da calibração do instrumento, possibilitará ao cliente maior confiabilidade para as medições realizadas com o próprio instrumento calibrado.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Fontes de radiação eletromagnética

As fontes de radiação podem ter como origem processos atômicos ou nucleares e são classificadas em quatro categorias genéricas (KNOLL, 2000), TAB 3.1.

TABELA 3.1 – Categorias genéricas das fontes de radiação

Fonte de radiação	Tipo de radiação
Radiação de partículas carregadas	Elétrons rápidos
	Partículas carregadas pesadas
Radiação sem carga	Nêutrons
	Radiação eletromagnética

Nesta divisão por categorias os elétrons rápidos podem ser provenientes do decaimento beta, positivo ou negativo, assim como os provenientes de quaisquer outros tipos. O decaimento alfa, a emissão de prótons ou íons que resultem em elementos carregados que possuam uma unidade de massa atômica ou mais, podem ser enquadrados na categoria das partículas carregadas pesadas (KNOLL, 2000).

As radiações sem carga incluem além dos nêutrons, a radiação gama, neutrinos e a radiação X, que é a radiação eletromagnética gerada no rearranjo das camadas eletrônicas e na interação das partículas carregadas com a eletrosfera, podendo ser raios X característicos ou radiação de freamento (*Bremsstrahlung*), respectivamente, que serão discutidos a seguir.

3.1.1 Radiação de freamento (*Bremsstrahlung*)

A radiação de freamento é a energia liberada na desaceleração de um elétron rápido lançado contra o átomo de determinado material. A fração da energia cinética convertida em radiação eletromagnética é

diretamente proporcional à energia do elétron incidente e ao número atômico do material do alvo.

Por ser uma partícula mais leve que o átomo, a perda de energia por unidade de percurso do elétron ocorre em taxas muito menores que as partículas carregadas pesadas (radiação α , por exemplo).

Os elétrons que saem do cátodo (filamento) são acelerados por uma diferença de potencial em direção ao alvo, e ao interagirem com este alvo, começam a perder energia cinética devido à força coulombiana, liberando fótons, seguindo o princípio da conservação de energia (BUSHBERG *et al.*, 2002).

Como a força coulombiana é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as partículas, é possível inferir que esses fótons apresentarão valores diferentes de energia. Quando um elétron interage com uma camada eletrônica mais distante do núcleo do átomo do alvo, desacelerará menos que um elétron que interagir com o núcleo, e este liberará sua energia cinética na forma de fóton (FIG. 3.1). Aproximadamente, 99% dessa energia cinética é transformada em calor, para a faixa de energia do feixe de raios X utilizado em diagnóstico por imagem. Para feixes de alta energia, cerca de 6 MeV, esta taxa é de 54% (BUSHBERG *et al.*, 2002).

FIGURA 3.1 – Produção de radiação *Bremsstrahlung* a partir de três possibilidades de interação do elétron incidente com o átomo do alvo. Adaptado de Bushberg *et al.* (2002).

3.1.2 Raios X característicos

Os raios X característicos são produzidos na interação dos elétrons emitidos pelo cátodo com os átomos do ânodo, removendo elétrons das camadas mais internas dos átomos. As vacâncias produzidas nestas interações são então preenchidas por elétrons das camadas mais externas. Este rearranjo eletrônico é acompanhado da emissão de fótons de raios X característicos, cuja energia é igual à diferença dos níveis de energia das camadas eletrônicas envolvidas (ATTIX, 1986). Os raios X característicos são emitidos em energias bem definidas, que dependem do material do ânodo. Além disso, os raios X característicos ocorrem apenas quando a energia dos elétrons incidentes no alvo for igual ou maior que a energia de ligação, do elétron à camada eletrônica que ele orbita, sendo esta diretamente proporcional ao número atômico do átomo que constitui o ânodo.

Na FIG 3.2 é apresentado o processo de produção dos raios X característicos.

FIGURA 3.2 – Produção de raios X característicos a partir da interação do elétron incidente com o átomo do alvo (UFTPR, 2016)

3.2 Interação da radiação com a matéria

Neste trabalho serão discutidas as interações da radiação com a matéria com maior probabilidade de ocorrência para o tipo da radiação (elétrons rápidos e fótons de raios X) e para a faixa de feixes com energia máxima estudados (25 keV a 150 keV), onde são mais prováveis ocorrências dos efeitos fotoelétrico e Compton, FIG 3.3.

FIGURA 3.3 – Relação dos três principais fenômenos de interação de fótons com a matéria, onde sobre as linhas a probabilidade de ocorrência dos efeitos vizinhos é exatamente igual. Adaptado de Knoll (2000).

3.2.1 Efeito fotoelétrico

Neste trabalho foram utilizados feixes de radiação X com energia máxima entre 25 e 150 keV, faixa energética em que predomina o efeito fotoelétrico. Este consiste na interação de um fóton de energia $h\nu$ com um elétron da eletrosfera do átomo, transferindo toda sua energia para o elétron, sendo a energia do fóton superior à energia de ligação (E_L) que mantém o elétron preso à camada eletrônica que ocupa, o elétron será ejetado do átomo com energia cinética (E_C), Eq 3.1.

$$E_C = h\nu - E_L \quad (3.1)$$

Este processo deixa uma lacuna na camada da qual o elétron foi arrancado, podendo ser preenchida pela captura de um elétron livre ou por meio de um arranjo eletrônico entre as camadas do átomo que ficou excitado podendo, neste processo, emitir um fóton de raios X característicos ao retornar ao seu estado fundamental.

A probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, como pode ser visto na FIG 3.3, aumenta com o número atômico do material. Matematicamente, a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico é

diretamente proporcional a Z^3/E^3 , onde Z é o número atômico do átomo no qual o fóton incide e E é a energia do fóton (BUSHBERG *et al.*, 2002).

3.2.2 Espalhamento elástico

O espalhamento elástico, ou coerente, ocorre quando o fóton incidente é emitido em uma direção diferente, mas sem mudar o comprimento de onda (λ), ou seja, sem alterar o valor da energia $h\nu$. Existem dois tipos de espalhamento elástico:

- Thomson: quando um único elétron do átomo está envolvido. Um fóton de baixa energia é absorvido pelo elétron e, por vibração, emite radiação no mesmo comprimento de onda, e
- Rayleigh: quando envolve todos os elétrons do átomo. Um fóton de baixa energia é absorvido pelos elétrons do átomo que, por vibração, emite radiação na mesma frequência do fóton incidente.

No espalhamento Rayleigh o átomo não sofre excitação nem ionização, apenas passa por um processo cooperativo entre os elétrons envolvidos. Este processo tem maior importância para fótons de baixa energia que interagem com átomos de alto Z .

3.2.3 Efeito Compton

Esta interação é mais comum de ocorrer entre fótons e elétrons pertencentes à camada de valência dos átomos, de onde o elétron é ejetado do átomo e o fóton é emitido com um decréscimo de energia em uma nova direção, FIG 3.4.

FIGURA 3.4 – Esquematização do espalhamento da radiação por efeito Compton. Adaptado de Bushberg *et al.* (2002)

A energia do fóton defletido $h\nu'$ pode ser calculada utilizando a Eq. 3.2:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (3.2)$$

onde: m_0 é a massa do elétron em repouso, e c é a velocidade da luz.

3.3 Espectro de raios X

O espectro de raios X é formado por duas distribuições de energia, uma discreta (raios X característicos) e outra contínua (radiação de freamento ou *Bremsstrahlung*).

Além da diferenciação entre a parte contínua e a parte discreta do espectro o uso da técnica de espectrometria pode inferir características importantes do feixe de radiação; dentre elas estão o material do alvo; a tensão de pico, ou diferença de potencial, aplicada entre o cátodo e o ânodo para acelerar os elétrons no tubo de raios X; a energia média do feixe, e a

camada semirredutora. A FIG 3.5 apresenta algumas das características que podem ser estudadas a partir do espectro de raios X.

FIGURA 3.5 – Efeitos da filtração do feixe no espectro de raios X. A curva A considera apenas os raios X de *Bremsstrahlung*. A curva B é um espectro proveniente de um alvo de tungstênio. A curva C resulta quando a filtração total aumenta (WOLBARST, 1993).

As diferenças entre as distribuições dos espectros, com e sem filtração, serão explicadas detalhadamente nos próximos itens.

3.3.1 Caracterização da qualidade do espectro de raios X

A espectrometria de raios X, que consiste na medição da distribuição de energia de um feixe de radiação incidente sobre um detector (KNOLL, 2000) pode ser utilizada para estimativas precisas da tensão de pico (kVp) do tubo (SAITO, 2007) da resolução espectral, da taxa de fluência de energia (ASSIAMAH *et al.*, 2005) e da filtração inerente (KHARRATI e ZARAAH, 2003), além de ser utilizada também para estimar grandezas dosimétricas, tais como: exposição, taxa de kerma no ar e a distribuição de

energia absorvida em um paciente ou objeto simulador (ANKERHOLD *et al.*, 1999).

3.3.2 Material do alvo

O conhecimento do material do alvo é importante para a espectrometria de raios X, uma vez que as componentes discretas K_{α} e K_{β} do espectro (FIG. 3.5) são determinadas pelas diferenças de energia entre as camadas da eletrosfera do átomo desse material. Essa diferença energética corresponde ao salto do elétron de transição de uma camada mais externa para a camada K, para preencher a lacuna deixada nesta. Quando o elétron de transição é proveniente da camada L, o pico característico é denominado K_{α} e quando é proveniente das camadas M, N ou O, é denominada K_{β} . Os valores de energia de transição são bem conhecidos e tabelados (BUSHBERG *et al.*, 2002).

Quanto maior a energia de ligação do elétron da camada K, ou seja, quanto maior o número atômico (Z) do átomo, maior será o valor da energia entre as camadas.

3.3.3 Tensão de pico, kVp

Ao selecionar a tensão num equipamento de raios X, determina-se a energia cinética com que os elétrons serão acelerados dentro do tubo de raios X, ou seja, seleciona-se a diferença de potencial entre o filamento (cátodo) e o alvo (BUSHBERG *et al.*, 2002).

Quanto maior o valor de tensão selecionado, mais interações o elétron fará até ser parado no alvo. A parte contínua do espectro de raios X possui probabilidades de ocorrência energeticamente dependentes, onde a parte de menor energia representa as colisões onde o elétron perde um pouco de energia com maior probabilidade de ocorrência, pois está sendo freado (*Bremsstrahlung*), e a de mais alta energia com menor probabilidade de ocorrência para o valor de tensão de pico selecionado, podendo ser aferido pelo ponto de menor número de contagens do espectro antes do zero (*end point*) (FIG. 3.5) (BUSHBERG *et al.*, 2002).

3.3.4 Energia Média, $\bar{E}$

Ao comparar a forma discreta com a forma contínua do espectro, (FIG. 3.5), percebe-se na primeira um pico de energia bem definido, e na segunda aparece com um intervalo de variação de energia maior e sem a definição de um pico de energia. Para contornar essa indefinição quantitativa da energia, criou-se o conceito de energia média que considera a contribuição de cada valor de energia situado entre a energia mínima e a energia máxima desse espectro. A energia média é definida por:

$$\bar{E} = \frac{\int_{E_{mín}}^{E_{máx}} E \cdot \Phi(E) dE}{\int_{E_{mín}}^{E_{máx}} \Phi(E) dE} \quad (3.3)$$

onde: $E_{máx}$ é a energia máxima definida por 1 keV acima da energia máxima nominal, tensão de pico selecionada no equipamento; $E_{mín}$ é a energia mínima que é determinada pelo início do incremento contínuo das contagens, e $\Phi(E)$ é a fluência do espectro (ANKERHOLD, 2006).

3.3.5 Camada semirredutora, CSR

A CSR é definida como a espessura de material necessária para reduzir a intensidade de um feixe de radiação, X ou gama, à metade do seu valor inicial (BUSHBERG *et al.*, 2002). Para a aplicação em radiodiagnóstico, a CSR é medida em mmAl.

Atrelada à definição de CSR, está a noção de filtração que consiste na utilização de um determinado material para eliminar contribuições indesejadas ao feixe de radiação.

A filtração pode ser inerente devido aos componentes do tubo de raios X (óleo refrigerante; janela do tubo, e para equipamentos de uso médico, o espelho do conjunto do colimador). A filtração também pode ser adicional, servindo principalmente para retirar os fótons de baixa energia (<15 keV), uma vez que estes não atravessaram o paciente para impressionar o sistema de imagem, contribuindo apenas para o aumento da dose absorvida pelo paciente (BUSHBERG *et al.*, 2002).

Tanto a CSR, quanto a filtração, são maneiras de medir indiretamente a energia efetiva do feixe. À medida que aumenta a filtração, também aumentará a energia efetiva do feixe, pois eliminam-se os fótons de menor energia (raios X moles). Este procedimento também é denominado “endurecimento de feixe”.

3.4 Grandezas e unidades

3.4.1 Exposição, X

Apesar da grandeza exposição ser a mais usada e difundida na radioproteção, sua unidade, Roentgen, deveria ter sido abandonada desde 1985 por recomendação da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM). Nesta mesma ocasião, a CGPM sancionou que as unidades do domínio das radiações ionizantes fossem dimensionadas em unidades do Sistema Internacional (SI). Uma das soluções adotadas para radiação de fótons por alguns países foi a utilização da “exposição em Sievert”, que considera $1 \text{ R} = 0,01 \text{ Sv}$ ($1 \text{ C/kg} = 38,76 \text{ Sv}$) (TAUHATA et al., 2011).

Assim, a grandeza é definida como “o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa dm , são completamente freados no ar” (TAUHATA et al., 2011).

3.4.2 Kerma, K

O *kerma* (“*kinectic energy released per unit of mass*”) é definido pela razão Eq. 3.4:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (\text{J.kg}^{-1} = \text{Gy}) \quad (3.4)$$

onde dE_{tr} é a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa dm (TAUHATA et al., 2011).

3.4.3 Fluência de partículas, Φ

A fluência de partículas Φ é a razão dN/da , onde dN representa o número de partículas que incidem em uma esfera de secção de área da , Eq. 3.5:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (\text{m}^{-2}) \quad (3.5)$$

O número de partículas pode corresponder a partículas transferidas, recebidas ou emitidas (TAUHATA *et al.*, 2011).

3.4.4 Dose absorvida, D

Dependendo do modo de interação da radiação com a matéria e a natureza do material, podem ocorrer variações da quantidade de energia absorvida por este. Em diferentes pontos do material, pode-se absorver diferentes quantidades de energia. Para evitar variações provenientes das diferenças de pontos do volume do material, definiu-se a dose absorvida (D) como a energia média depositada pela radiação no ponto P de interesse, num meio de massa dm , Eq. 3.6 (TAUHATA *et al.*, 2011).

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (\text{J.kg}^{-1} = \text{gray (Gy)}) \quad (3.6)$$

3.5 Detectores

Neste estudo foram utilizados dois tipos de detectores, câmaras de ionização e de estado sólido, especificamente, semicondutores; logo, somente serão abordados os princípios de funcionamento e características destes dois tipos.

3.5.1 Câmara de ionização

Um dos mais antigos e mais utilizados tipos de detectores baseia-se na coleta de cargas produzidas pelos processos de ionização e excitação decorrentes do caminho percorrido por uma partícula carregada dentro de

um gás. Os que fazem uso deste processo de detecção denominam-se câmaras de ionização (KNOLL, 2000).

Em função da grande estabilidade que possuem (em torno de 0,1% de variação ao longo de anos), as câmaras de ionização são bastante utilizadas como instrumentos de referência, ou padrão, para calibração, devido às calibrações frequentes se tornarem desnecessárias (TAUHATA *et al.*, 2003).

Em geral, uma câmara de ionização é constituída por dois ou mais eletrodos, aos quais é aplicada uma diferença de potencial, envolvendo um gás, que faz o papel de volume sensível da câmara. A radiação ionizante que incide nesse gás produz vários íons que são coletados pelos eletrodos, criando um fluxo de íons (corrente elétrica da ordem de 10^{-12} A) que é medido por um instrumento sensível conectado à câmara de ionização, o eletrômetro (TAUHATA *et al.*, 2003). A esquematização de uma câmara de ionização pode ser vista na FIG 3.6.

FIGURA 3.6 – Esquematização simples do desenho do projeto de uma câmara de ionização qualquer (OLIVEIRA, 2008).

O principal tipo de câmara de ionização é a de ar livre, pois consegue coletar todos os íons primários e secundários que interagiram somente com o ar, possibilitando a obtenção das grandezas kerma no ar e exposição (BURNS e BÜERMANN, 2009), configurando-a como instrumento primário de medição. Porém, este tipo de câmara tem seu uso mais comum em laboratórios de calibração, devido à necessidade de condições de operação controladas.

Em hospitais e clínicas, para realização de controle de qualidade dos equipamentos e levantamentos radiométricos da instalação, são usadas as câmaras encapsuladas com volume definido, sendo que o invólucro contém um orifício que permite que o ar do volume sensível esteja equilibrado com o ar do meio externo à câmara; esta situação gera a influência de fatores como pressão atmosférica e temperatura na resposta da câmara de ionização, mas esta influência pode ser corrigida utilizando a Eq 3.7.

$$F_{T,P} = \left(\frac{T_m + 273,15}{293,15} \right) \cdot \frac{101,3}{P_m} \quad (3.7)$$

onde: $F_{T,P}$ é o fator de correção para temperatura e pressão; T_m é a temperatura na hora da medição, em graus Celsius (°C), e P_m é a pressão atmosférica na hora da medição, em kilopascal (kPa).

3.5.2 Detectores semicondutores

As primeiras versões dos detectores semicondutores datam de meados da década de 1960 e foram chamados de contadores de cristal. Os mais modernos ganharam a nomenclatura de detectores de diodo semicondutores ou simplesmente detectores de estado sólido. Os semicondutores são os detectores sólidos comparáveis às câmaras de ionização, devido aos processos de coleção de pares de elétron-buracos produzidos proporcionalmente à energia depositada pela radiação incidente (KNOLL, 2000).

Semicondutores são estruturas cristalinas que possuem bandas de energia separadas, em energia, por uma região, de aproximadamente 1 eV de largura, denominada zona proibida (ou *gap*). A amplitude da zona proibida é o principal critério a cerca da condutividade do material, ou seja, se ele é isolante, semicondutor ou condutor.

As bandas de energia separadas pelo *gap* são as bandas de valência, onde os elétrons normalmente permanecem num material não excitado, com energia mais baixa, e de condução, para onde os elétrons normalmente migram (TAUHATA *et al.*, 2003), FIG 3.7.

FIGURA 3.7 – Estrutura de bandas em dois materiais, um isolante e um semicondutor, onde E_i é a largura em energia do intervalo de separação, *gap* (TAUHATA *et al.*, 2003)

À medida que os elétrons da banda de valência são excitados e passam para a banda de condução deixando uma lacuna, chamada de buraco que tem carga positiva, pela ausência do elétron, da mesma forma, na presença de um campo elétrico, o elétron migra para a banda de condução, o buraco será direcionado à banda de valência (TAUHATA *et al.*, 2003).

Quando o fóton incide no detector cria inúmeros pares elétron-buracos ao longo da sua trajetória, que são coletados pelo campo elétrico aplicado ao material. A energia média necessária para criar um par elétron-buraco em um cristal de telureto de cádmio (CdTe) é de ≈ 5 eV e a amplitude do *gap* é de $\approx 1,6$ eV (KNOLL, 2000), detector que foi utilizado na execução deste trabalho.

Os cristais semicondutores geralmente contêm impurezas que são classificadas em: do tipo n (que possuem mais elétrons na camada de valência que o material do cristal) e do tipo p (que possuem buracos em excesso, isto é, menos elétrons na camada de valência que o material do

cristal semiconductor). Estas impurezas são colocadas junto às bandas de condução e de valência, respectivamente. A funcionalidade de uma junção p-n (impurezas dos dois tipos de materiais presentes no cristal) é a de um diodo dificultando ou facilitando a passagem da corrente elétrica de acordo com a aplicação da tensão.

Normalmente, os detectores semicondutores são os escolhidos para a espectrometria de raios X, sendo os detectores de Germânio Hiperpuro (HPGe) ou de Silício os que apresentam boa resolução em energia e eficiência de detecção, porém exigem uma estrutura física sofisticada para o seu uso, incluindo refrigeração à nitrogênio líquido, para uma temperatura de ≈ 77 K, aumentando os custos associados à medição.

Devido a estas limitações, surgiram detectores compactos e que operam em temperatura ambiente, como os de CdTe e de Telureto de Cádmio e Zinco (CZT), que estão sendo amplamente utilizados.

O cristal de CdTe possui peso atômico médio relativamente alto devido aos de seus componentes (Cd, $Z=48$; Te, $Z=52$) e quando comparado ao Ge ($Z=32$) possui maior probabilidade de absorção fotoelétrica por unidade de caminho percorrido, da ordem de 4 a 5 vezes maior (TAUHATA *et al*, 2003); logo, o CdTe possui melhor eficiência de detecção da radiação e uma pior resolução quando comparado ao HPGe.

3.6 Calibração de instrumentos

Mesmo utilizando-se alguns dos melhores detectores, as medições de radiação, no máximo, fornecem apenas resultados que são aproximações da grandeza de referência. No caso da radiação eletromagnética, mesmo que um instrumento meça o kerma no ar com grande precisão, o fator de conversão para se obter a dose num determinado volume pode variar muito com a energia da radiação e a sua direção de incidência. Instrumentos não calibrados no passado causaram grandes erros na estimativa das doses.

A calibração de um instrumento, por definição, é o processo pelo qual se estabelece uma relação entre valores de medição de um padrão, com as respectivas incertezas, e as indicações com as incertezas associadas do instrumento de medição a ser calibrado (INMETRO, 2012).

Os principais objetivos de um sistema de calibração são (IAEA, 2000):

- a. Garantir que o instrumento esteja funcionando devidamente e de maneira adequada para o propósito a que foi projetado;
- b. Determinar, sob condições padrões controladas, a indicação de leitura do instrumento como uma função do valor real medido por meio de um instrumento padrão;
- c. Submeter o instrumento a testes, como resposta à energia e direção da radiação, efeitos ambientais, etc;
- d. Ajustar o instrumento, se possível, para que a precisão da medida seja otimizada, e
- e. Fornecer padrões de radiação para testes de novos detectores.

Para instrumentos de radiação X ou gama, são aceitos internacionalmente quatro métodos (IAEA, 2000):

- utilização do instrumento padrão sem câmara monitora;
- utilização do instrumento padrão com câmara monitora;
- irradiação simultânea dos instrumentos (padrão e sob calibração), e
- irradiação num campo de radiação conhecido.

Estes métodos estão incorporados, basicamente, nas duas técnicas definidas para a calibração de instrumentos:

- 1. *Uso de campos de radiação com propriedades bem conhecidas*: um campo de radiação pode ser definido a partir do conhecimento de certos parâmetros de uma fonte padrão ou por medidas feitas com um padrão secundário.
- 2. *Técnica da substituição*: um instrumento de referência é colocado no campo de radiação; em seguida, o instrumento a ser calibrado substitui o primeiro. Os dois instrumentos devem ocupar exatamente a mesma posição no feixe de radiação. A calibração é feita por comparação entre as duas leituras.

Para realizar as calibrações com radiação X no LCI/IPEN, utiliza-se o instrumento padrão com câmara monitora, ou método da substituição, que consiste na comparação entre as respostas do instrumento sob teste com as do padrão do laboratório. Logo, a verificação com o padrão é realizada antes e após a irradiação do instrumento a ser calibrado, e a câmara monitora serve para a verificação das condições de irradiação desses dois instrumentos.

Após obter as medições realizadas com o instrumento padrão, valor convencional (VC), e com o instrumento sob teste (M_{cal}), é obtido o coeficiente de calibração (N_{cal}), conforme Eq. 3.8 (IAEA, 2007):

$$N_{cal} = \frac{VC}{M_{cal}} \quad (3.8)$$

Logo, o coeficiente de calibração irá converter o valor indicado no instrumento para a grandeza de referência num ponto de referência. No LCI/IPEN, para feixes de radiodiagnóstico este padrão possui seu N_{cal} em relação a um laboratório primário (PTB), sendo assim ao se calibrar um instrumento, utilizando este padrão, esta calibração, dentro da cadeia metrológica, será padrão terciário.

Para que a calibração seja feita, é necessário que as qualidades do feixe primário de raios X, transmitido pela janela do tubo gerador, sejam reprodutíveis. Essas qualidades são caracterizadas por alguns parâmetros como (ISO, 1996):

- energia média do fóton;
- resolução espectral;
- camada semirredutora (CSR), expressa em milímetros de alumínio (mmAl) ou cobre (mmCu), e
- coeficiente de homogeneidade (h).

Na prática, a qualidade da radiação obtida depende principalmente da alta tensão do tubo de raios X, da espessura e da natureza da filtração total do feixe e das propriedades do ânodo (alvo) (ISO, 1996).

3.7 Simulação pelo método de Monte Carlo

O método de simulação pelo método de Monte Carlo é considerado instrumento apropriado para o estudo dos fenômenos relacionados ao transporte de radiação. Está fundamentado na amostragem de números pseudo-aleatórios distribuídos no intervalo $[0;1]$ e métodos estatísticos para resolução de problemas difíceis ou impossíveis por métodos indiretos. O crescente avanço tecnológico na área de informática, com o emprego de microcomputadores de alta capacidade de processamento, torna o método viável em diversos campos de estudo.

O método de Monte Carlo (MC), para simulação direta de um processo físico, requer determinação das funções de densidades de probabilidade (FDP) que estabelecem as condições de contorno do processo (YORIAZ, 2009). As FDP's indicam a probabilidade de ocorrência das interações de uma partícula num meio, seu alcance, o caminho livre médio, perda de energia e mudança de direção sofrida. Identificadas as FDP's, as amostragens aleatórias devem ser repetidas até a obtenção do resultado esperado, considerando que a precisão dos resultados alcançados melhora com o aumento do número de histórias simuladas (LOS ALAMOS, 2008).

Na simulação pelo método por MC, o fóton entra aleatoriamente em um material podendo interagir ou não dentro deste. Na faixa de energia utilizada neste trabalho as principais formas de interação são por efeitos fotoelétrico e Compton. Evidentemente que a simulação não descarta a probabilidade do fóton não interagir com o material; esta possibilidade é determinada por uma FDP. Para cada número aleatório ξ , com $0 \leq \xi < 1$, é calculada a distância percorrida pelo fóton até que ocorra a primeira interação.

Para simular um problema físico no método de MC são necessárias algumas especificações, realizadas em um arquivo de entrada. As especificações incluem geometria de irradiação, tipo de radiação, seções de choque, grandezas pretendidas para o cálculo, número de histórias a serem simuladas e inclusive técnicas de redução de variância.

Para o código de transporte da radiação MCNPX, o arquivo de entrada é composto por três blocos denominados cartões: cartão de célula,

onde é feita a delimitação das regiões de estudo definindo forma, tipo e densidade do material; cartão de superfícies, onde são apresentadas as dimensões e o posicionamento no espaço de interesse, utilizando mnemônicos que determinam a geometria (por exemplo, plano (p), esfera (s), cone (kz), cilindro (cz) elipse (sq)), e o cartão de dados, onde é definido o tipo e o modo de transporte das partículas, além dos materiais envolvidos e energias. A forma de saída dos resultados é definida através de comandos denominados “*tallies*”, que podem determinar se a grandeza determinada será o fluxo num detector ou a corrente integrada em uma superfície (LOS ALAMOS, 2008).

O programa ao final da simulação também fornece o erro relativo, que pode ser útil para a interpretação dos erros do problema analisado.

Neste estudo foi utilizado o código computacional MCNPX para descrever o transporte de radiação e de partículas, tais como fótons e elétrons na matéria. O código transporta essas partículas para uma ampla faixa de energia de fótons (1 keV-100 GeV) e elétrons (1 keV-1 GeV), o que o torna atraente para muitas áreas da ciência. Para o transporte de fótons, o código contabiliza o espalhamento incoerente e coerente, a possibilidade de emissão fluorescente após a absorção fotoelétrica e *Bremsstrahlung*. Para o transporte de elétrons, é utilizado o modelo de perda de energia por aproximação contínua. A perda de energia do elétron é acompanhada pelo MCNPX quebrando o caminho do elétron em várias etapas. Para melhorar a eficiência do elétron e do transporte de fótons, são utilizados dois cartões: PHYS: P e PHYS: E (PELOWITZ, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Sistema de raios X

O LCI/IPEN dispõe de um sistema de radiação X para um intervalo de tensão de pico entre 5 e 160 keV, formado por um gerador de potencial constante Agfa NDT Pantak/Seifert GmbH&Co. KG., Alemanha, modelo ISOVOLT 160 HS, ligado a um tubo de raios X da Comet, modelo MRX 160/22 com ânodo estacionário (alvo de tungstênio) e janela de berílio com 1mm de espessura. O tubo está posicionado dentro de uma blindagem de chumbo, onde sua janela está posicionada em frente a um obturador (*shutter*) presente na blindagem que é controlado por um comando eletrônico de abertura e fechamento, localizado junto ao painel de comando do tubo de raios X, fora da sala de irradiação.

O equipamento permite ainda a seleção da corrente elétrica do filamento do tubo (cátodo) em um intervalo que varia entre 0,1 e 45 mA, proporcionando uma potência máxima de 3 kW.

O sistema conta com uma mesa sobre trilhos e marcadores a laser para posicionamento dos detectores ou amostras, com posições de referência de 0,5 m (utilizada para feixes de terapia), 1,0 m (utilizada para feixes de radiodiagnóstico) e 2,5 m (utilizada para feixes de radioproteção) relativas à distância entre a marcação e o foco do tubo de raios X.

Associada ao sistema de radiação X, FIG. 4.1, há uma roda de filtros da PTW, modelo T90011, controlada via software, Bench Control S160003. A roda de filtros permite até 24 filtrações diferentes em seus consoles, sendo que o LCI/IPEN possui 19 qualidades de radiação estabelecidas em sua rotina, com filtros de Cu, Al, Sn e Mo com pureza de 99,9%, sendo estas 19 qualidades divididas em 8 dedicadas ao radiodiagnóstico convencional (RQR's e RQA's 3, 5, 8 e 10), 3 relativas à tomografia computadorizada (RQT 8 – 10), 4 para mamografia (RQR's e

RQA's, M2 e M4) e 4 para radioproteção (N-60, N-80, N-100 e N-150), TAB 4.1.

FIGURA 4.1 – Sistema de radiação X do LCI/IPEN (SILVA, 2013).

O tamanho de campo utilizado depende da distância de medição e do tamanho dos colimadores utilizados na saída do feixe. Para as qualidades que usam a distância foco-detector de 1 m o tamanho útil de campo (região na qual o feixe é considerado homogêneo, diferença $< 5\%$ entre o centro e as extremidades do campo) é de 12 cm x 12 cm e aquelas que usam a distância de 2,5 m possuem uma área útil de 42x42 cm².

TABELA 4.1 - Qualidades de radiação X para radiodiagnóstico e radioproteção implantadas no LCI/IPEN, utilizadas neste estudo.

Qualidade	Tensão (kV)	Corrente Anódica (mA)	Filtração (mm)	Taxa de kerma no Ar (mGy/min)
RQR 3	50	10	2,40 (Al)	$21,6 \pm 0,5$
RQR 5	70	10	2,80 (Al)	$36,6 \pm 0,9$
RQR 8	100	10	3,20 (Al)	$66,4 \pm 1,5$
RQR 10	150	10	4,20 (Al)	$115,0 \pm 2,6$
RQT 8	100	10	3,2 (Al) + 0,30 (Cu)	$22,0 \pm 0,5$
RQT 9	120	10	3,5 (Al) + 0,35 (Cu)	$34,0 \pm 0,8$
RQT10	150	10	4,2 (Al) + 0,35 (Cu)	$57,0 \pm 1,3$
N-60	60	20	4,0 (Al) + 0,6 (Cu)	$(33,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$
N-80	80	20	4,0 (Al) + 2,0 (Cu)	$(17,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$
N-100	100	20	4,0 (Al) + 5,0 (Cu)	$(8,22 \pm 0,18) \cdot 10^{-3}$
N-150	150	20	4,0 (Al) + 2,5 (Sn)	$(70,4 \pm 1,6) \cdot 10^{-2}$

4.2 Sistemas de detecção

Os sistemas espectrométricos disponíveis para a realização deste trabalho foram dois semicondutores, sendo um com detector HPGe e o outro com CdTe:

- HPGe fabricado pela empresa EG&G Ortec, modelo NOMAD-PLUS 92X, que possui um detector de estado sólido (semicondutor) HPGe (Germânio de alta pureza), modelo GLP-16195/10P com janela de incidência de radiação de 3 cm de diâmetro e espessura de 0,5 mm de Berílio, acoplado ao sistema de aquisição e software de análise Maestro, da ORTEC, de propriedade do LCI/IPEN, FIG. 4.2;
- CdTe fabricado pela Amptek, modelo XR-100T-CdTe. O detector é um diodo de CdTe com dimensões de 3 mm x 3 mm de área superficial, 1 mm de espessura, e densidade igual a 6,2 g/cm³. Os eletrodos são compostos de platina (Pt, 0,2 µm) no cátodo, e de índio (In, 1,0 µm)

no ânodo. O detector possui resfriamento termoelétrico, utilizando células de Peltier, que o mantém a uma temperatura de aproximadamente $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. O detector possui uma janela de Be com espessura de $100\text{ }\mu\text{m}$. Acoplado ao detector há um pré-amplificador que se comunica com um módulo compacto; que reúne fonte de alta tensão, amplificador, conversor analógico digital e processador digital de pulsos, modelo PX4, também da Amptek. Este sistema, FIG. 4.3, foi conectado a um computador portátil e a aquisição dos dados foi realizada usando o software ADMCA, desenvolvido pela Amptek.

Para ambos detectores foram utilizados dois discos colimadores de tungstênio, fornecidos pela Amptek, um de $1000\text{ }\mu\text{m}$ na entrada do colimador e outro de $400\text{ }\mu\text{m}$ próximo à face do detector. O uso dos colimadores tem como objetivo garantir que seja medido somente o feixe primário, retirando a influência de fótons espalhados, e a redução da intensidade do feixe incidente no detector.

FIGURA 4.2 – Sistema de espectrometria do detector de HPGe com colimador adaptado.

FIGURA 4.3 – Sistema de espectrometria do detector de CdTe.

O espectrômetro de CdTe é de propriedade do laboratório ProSaúde do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do estado da Bahia (LabProSaude/IFBA) e foi cedido para a realização deste estudo com a condição da posterior implantação deste estudo no LabProSaude/IFBA, que é um laboratório de calibração de instrumentos utilizados para medições dos níveis de radiação ionizante padrão secundário.

Além dos espectrômetros, foram utilizadas as câmaras de ionização de referência do LCI/IPEN para as qualidades de radiodiagnóstico, todas da marca Radcal: uma câmara tipo cilíndrica, com volume de 6 cm^3 ; uma para mamografia, com volume de 6 cm^3 ; uma para tomografia, tipo lápis, com 10 cm de comprimento. Para as qualidades de radioproteção, foi utilizada uma câmara fabricada pela PTW, tipo esférica, com volume de 1000 cm^3 . Estas câmaras foram utilizadas para a determinação das taxas de kerma no ar de referência e são mostradas na FIG. 4.4. Todas as câmaras de ionização foram acopladas a um eletrômetro da PTW modelo UNIDOS E, (FIG. 4.5 B) e possuem rastreabilidade ao Laboratório Primário Alemão, PTB.

FIGURA 4.4 – Câmaras de ionização padrão secundário Radcal/PTW: (A) radiodiagnóstico convencional; (B) mamografia; (C) tomografia computadorizada; (D) proteção radiológica.

O controle da manutenção da taxa de kerma no ar de referência é feito pelo uso de uma câmara de transmissão de placas paralelas, tipo monitora, marca PTW, modelo 34014, acoplada a um eletrômetro marca PTW, modelo Unidos E (FIG. 4.5).

FIGURA 4.5 – (A) Câmara monitora PTW, modelo 34014, posicionada e centralizada entre dois colimadores. (B) Eletrômetro PTW, modelo Unidos.

4.3 Espectrometria

Antes de realizar a medição do espectro de energia do feixe de radiação é necessário realizar a calibração do detector em energia e garantir o alinhamento entre o feixe primário de radiação e a face do detector utilizado.

4.3.1 Posicionamento dos espectrômetros

Dada a importância do alinhamento do detector para a execução da medição, foram pensados arranjos experimentais que garantissem o alinhamento entre a superfície frontal (face) do detector e o feixe primário de radiação X. O detector deve estar posicionado de forma que os raios X incidam perpendicularmente à face do material sensível.

Este arranjo deve ser reproduzível e de fácil montagem, devido ao uso variado do laboratório, dividido entre pesquisa e calibrações de rotina, e à sensibilidade dos detectores ao manuseio, inclusive, no caso do HPGe, à necessidade de resfriamento com nitrogênio líquido.

Para garantir tais condições foi desenvolvido no IPEN um arranjo de posicionamento do detector de HPGe que consiste em uma placa de alumínio, que serve como base para o conjunto; um disco de alumínio, que fora fixado à blindagem de chumbo que envolve o detector, com um furo centralizado com rosca, para adaptar o colimador da Amptek, e um suporte em forma de “M” para a blindagem, confeccionado de forma que não permitisse o apoio da blindagem no pescoço do detector.

O conjunto do detector de CdTe contém um tripé para posicionamento, porém não fornece estabilidade no posicionamento, sequer reprodutibilidade para tal. Para conseguir manter o conjunto estável seria necessária a utilização de um calço. Assim, foram adquiridos um goniômetro com 92 mm de diâmetro, com precisão de 0,5° e uma mesa elevadora com 20 cm x 15 cm de superfície, ambos da Optron[®].

Para alinhar os detectores ao feixe primário foram utilizados os sistemas lasers de posicionamento instalados ao longo do trilho de calibração. Primeiramente foram colocados apenas os colimadores da

Amptek no laser, como mostra a FIG 4.6, para garantir que os feixes do laser estavam alinhados com o orifício do colimador e só então foram encaixados os detectores.

FIGURA 4.6 –Alinhamento do orifício do colimador com o feixe de radiação.

Para posicionar o detector de CdTe ao longo do trilho foram utilizados os lasers de posicionamento laterais com distâncias foco detector fixas de 1 m e 2,5 m, conforme descrito no item 4.1.

4.3.2 Aplicabilidade dos detectores

A proposta inicial deste trabalho era pautada em uma comparação entre os detectores de HPGe e CdTe, tendo em vista que o LCI/IPEN possui apenas o detector de germânio, e o CdTe, como já mencionado, é de propriedade do LabProSaude/IFBA, possibilitando a viabilidade para quaisquer dos detectores.

Para garantir as condições de medição, em feixe padrão de radiação X, foram realizadas medições com o objetivo de estudar a sensibilidade do sistema de detecção (detector junto com a eletrônica associada).

As medições consistiram na investigação do tempo morto de detecção para diferentes taxas de radiação X, sendo que os detectores

diferem entre si no tempo de processamento. Enquanto o CdTe trabalha com um tempo de formação de pulso μs – ns, o detector de germânio trabalha na magnitude de tempo de ms - μs .

Para a realização deste teste foi considerado o tempo morto máximo de 5% para ambos os detectores, para não causar danos à estrutura do detector por exposição a taxas de dose altas. A taxa de dose foi variada utilizando-se da lei do inverso quadrado da distância e alterando a corrente anódica. Foram utilizadas tensões de pico do tubo no intervalo 28 a 100 kVp e as taxas de contagens variaram de 0,048 a 49 kcps para medições de 5 s, tempo suficiente para que o sistema indique o tempo morto para aquela medição.

De acordo com os resultados que serão apresentados no Capítulo 5, foi decidido trabalhar somente com o detector CdTe, visto que, além do alto tempo morto obtido para o HPGe, quando exposto a taxas mais altas; o custo de operação, devido à necessidade de resfriamento com nitrogênio líquido, e às dimensões do detector que dificultam o uso em campo, também é alto.. Assim, a partir deste ponto serão apresentados procedimentos realizados apenas com o detector de CdTe.

4.3.3 Calibração em energia do detector

Para realizar a espectrometria é necessário que o detector esteja calibrado em energia, isto é, que se estabeleça uma relação entre o canal em que está ocorrendo o evento e a energia que corresponde àquele canal. Foram utilizadas duas fontes radioativas (^{241}Am e ^{152}Eu), produzidas pela Eckert&Ziegler, com material ativo disperso em uma matriz epóxi e acondicionado em um invólucro plástico com dimensões de 12 mm de diâmetro por 55 mm de comprimento. Os fotopicos utilizados para este procedimento são apresentados na TAB. 4.2.

TABELA 4.2– Fotopicos utilizados para a calibração em energia do sistema espectrométrico de CdTe (IAEA, 2016)

Energia (keV)	Radionuclídeo
13,90	²⁴¹ Am
59,54	²⁴¹ Am
121,78	¹⁵² Eu

A calibração foi realizada utilizando-se o ajuste linear gerado na correspondência entre a energia do fotopico da fonte radioativa e o canal em que o centróide deste fotopico foi gerado. Para gerar as curvas neste trabalho foi utilizado o programa Origin 8.0®.

Neste estudo foram realizadas duas calibrações em energia: a primeira com o objetivo de averiguar a tensão de pico fornecida pelo sistema de raios X e a segunda para a obtenção dos espectros necessários para o cálculo do kerma de maneira compatível com a função resposta do detector, obtida por simulação.

Para a averiguação da tensão de pico do tubo foi realizada a espectrometria das fontes de calibração utilizando 4096 canais, com resolução de $(0,04290 \pm 0,00018)$ keV por canal, ganho de $\times 30,31$, *rise time* de 0,8 μ s e *top time* de 0,2 μ s. Este procedimento teve o objetivo de se obter uma maior precisão na determinação da tensão de pico, comumente chamada de “*endpoint*” (ponto de intersecção da extrapolação da parte linear de alta energia do espectro com o eixo da energia ISO (1996).

Os espectros utilizados para o cálculo do kerma foram calibrados com as mesmas fontes de ²⁴¹Am e ¹⁵²Eu, porém foram alterados o número de canais, utilizando 512 canais com resolução de aproximadamente $(0,5060 \pm 0,0012)$ keV, o ganho foi de $\times 20,93$, sendo o *rise time* e o *top time* mantidos constantes. O objetivo dessa configuração foi compreender o intervalo energético dos espectros mantidos em 300 canais, devido à função resposta, que foi simulada, ter como saída um arquivo com uma matriz de 300 linhas por 300 colunas, facilitando a correção apresentada no item 4.5.

O arranjo utilizado para estas calibrações está apresentado na FIG 4.7.

FIGURA 4.7 – Arranjo de calibração do detector CdTe.

4.3.4 Medição dos espectros

Os espectros foram medidos de acordo com o procedimento estabelecido no LCI/IPEN para as taxas de dose de referência das qualidades de feixe já implementadas. Porém, para algumas delas foi necessário alterar a corrente anódica, devido ao tempo morto gerado na medição ($> 5\%$). A alteração deste parâmetro pode ser corrigida de duas formas: a primeira considerando a linearidade da resposta do detector relacionada à corrente anódica, que é diretamente proporcional à taxa emitida pelo tubo de raios X, e a segunda normalizando o cálculo do kerma pelo produto corrente tempo; optou-se pela primeira possibilidade devido à falta de um controle da corrente na hora da irradiação.

As condições de medição de cada espectro são apresentadas na
TAB. 4.3.

TABELA 4.3 – Condições de medição dos espectros das qualidades de radiação implementadas no LCI/IPEN.

Qualidade medida	Corrente anódica (mA)	Distância foco- detector (m)	Tempo de medição (s)
RQR-3	1,00	1,0	120
RQR-5	1,00	1,0	120
RQR-8	0,20	1,0	120
RQR-10	0,10	1,0	120
RQT-8	0,20	1,0	120
RQT-9	0,20	1,0	120
RQT-10	0,20	1,0	120
N-60	5,00	2,5	120
N-80	3,00	2,5	120
N-100	3,00	2,5	120
N-150	1,00	2,5	120

4.4 Determinação da tensão de pico (kVp)

A determinação da tensão de pico foi feita por meio da espectrometria, utilizando a técnica denominada *endpoint*, que consiste na obtenção do ponto de intersecção entre a extrapolação linear da parte final do espectro (cauda do espectro) e o eixo da energia.

Para realizar esta análise foi utilizada a ferramenta de extrapolação linear do *software* Origin[®]. Foi feita uma interpolação linear na parte final do espectro e em seguida foi realizado um ajuste linear para estes pontos interpolados. O valor da tensão de pico foi obtido dos coeficientes do ajuste linear considerando que o valor do eixo da ordenadas fosse nulo ($y=0$).

Os dados obtidos foram utilizados como correção para os parâmetros das qualidades estabelecidas, considerando a variação máxima de 1,5% para a tensão nominal e a mensurada, conforme IEC (2005).

4.5 Simulação pelo método de Monte Carlo

O detector de CdTe foi modelado computacionalmente utilizando o código de transporte de radiação MCNPX (versão 2.7.0) fornecido pelo Dr. William de Souza Santos¹.

Primeiramente foi feita a descrição do cenário, onde foram considerados os componentes descritos pelo fabricante do detector, que continham desde as espessuras e materiais utilizados (vide item 4.2), até a zona morta do detector, também informada pelo fabricante, de 0,2 μm . A representação do detector é de extrema importância para assegurar que a simulação corresponderá aos parâmetros fornecidos pelo fabricante. Para a orientação espacial da geometria das células descritas foi considerada como origem o centro do detector de CdTe.

¹ Professor Dr. da Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

Após a descrição da geometria e materiais do detector foi necessário validar a geometria com a simulação de uma fonte de comportamento conhecido, para isso foi utilizada a fonte de ^{241}Am . Os dados obtidos experimentalmente foram utilizados como parâmetros de entrada e foi obtido o espectro simulado da fonte de ^{241}Am . Com este procedimento validou-se a geometria utilizada e foi possível realizar os objetivos deste trabalho que competem à simulação pelo método de Monte Carlo, o cálculo da função resposta do detector com as complexas considerações relativas ao escape de raios X, não interação dos fótons com o cristal, ângulo sólido, dentre outros; a partir da eficiência pode-se obter a função resposta do detector que auxiliou na correção dos espectros obtidos.

Além das especificações dos materiais que foram utilizados nos dispositivos do detector e da fonte de radiação foram fornecidos parâmetros que relacionam a capacidade de alargamento da gaussiana em energia, isto é, parâmetros que indicam a largura máxima à meia altura (FWHM, do inglês “*Full Width at Half Maximum*”) dos fotopicos obtidos para cada energia (E) pelo detector. Esta informação possibilita que a simulação seja mais específica, através do *tally F8* são fornecidos os parâmetros a, b e c da Eq 4.1.

$$FWHM = a + b\sqrt{E + c \cdot E^2} \quad (4.1)$$

Para todas as simulações foram utilizadas 10^9 histórias de partículas com o objetivo de garantir boa significância estatística.

O feixe de raios X também foi simulado utilizando o programa Spekcalc[®], com o objetivo de obter o espectro produzido na saída da filtração adicional do feixe, não considerando qual tipo de detector é utilizado na espectrometria. O programa consiste em uma base de dados de espectros teóricos obtidos do catálogo de espectros disponibilizado na publicação IPEM 78. Nele é possível alterar o ângulo de saída do feixe, em relação ao alvo, além de filtrações inerentes e adicionais. Na FIG 4.8 é apresentada a tela do programa Spekcalc[®]

FIGURA 4.8- Tela do programa Spekcalc com a formação do espectro para a qualidade de radiação RQT-9.

4.6 Correção dos espectros

Para corrigir os espectros foi utilizada uma matriz resposta obtida pela simulação com o código MCNPX. Este método considera que o espectro medido difere do espectro real do feixe de energia, devido aos fenômenos fisicamente inevitáveis. Para a faixa de energia utilizada em radiodiagnóstico e considerada neste estudo é necessário considerar os seguintes fenômenos:

- i) a dependência energética da eficiência de detecção;
- ii) os efeitos de escape;
- iii) o efeito Compton;
- iv) a coleta incompleta de carga dentro do volume do detector.

A matriz resposta (**R**) contempla estes fenômenos corrigindo assim o espectro experimental aproximando-o do real. Ela é uma matriz quadrada, normalmente de 300x300, onde cada coluna representa a resposta do detector a um pico monoenergético. A variação de energia para estes fotopicos foi de 0,5 keV e o intervalo de energia utilizado foi de 5 keV a 150 keV.

Para se obter a matriz resposta deve-se considerar o vetor linha **A**, como aquele que contém as informações do espectro real, sendo A_i o número de contagens com energia E_i , variando com o incremento ΔE de 0,5 keV, para este trabalho, até $E_{\text{máx}} = 150$ keV. Além do vetor **B**, que contém as contagens do espectro experimental, sendo B_k cada elemento deste vetor numa energia E_k , que para facilitar a correção do espectro teve como incremento energético na calibração aproximadamente 0,5 keV.

No processo de medição, o espectro real inicial, ainda desconhecido, **A**, é transformado no espectro experimental, **B**, o que pode ser expresso como:

$$B = A \cdot R \quad (4.1)$$

Fornecendo a matriz de resposta **R** é obtido o espectro real, **A**, que pode ser reconstruído a partir do espectro experimental, **B** (KURKOVA e JUDAS, 2017)

$$(4.2)$$

$$A = B.R^{-1}$$

Para realizar as correções dos espectros foi utilizado o programa desenvolvido e cedido por Moralles *et al*, 2007.

4.7 Cálculo da taxa de kerma no ar

O cálculo da taxa de kerma no ar foi realizado utilizando tanto os espectros experimentais quanto os corrigidos. Para se obter o valor da taxa de kerma foi utilizada a Eq. 4.3 (PEREIRA, 2004)

$$K_{ar} = \frac{\int_{E=0}^{E_{max}} 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot \Phi_{Ec} \cdot E_c \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right) dE}{t_e} \cdot f_{cl} \quad (4.3)$$

onde Φ_{Ec} é a fluência para a energia E_c , calculada pela Eq 4.4, que considera as contagens em cada canal ($N(E_c)$); quando foram calculadas as taxas de kerma no ar para o espectro corrigido utilizou-se o $N(E_c)_{corrigido}$, e a área irradiada do detector (A); para este estudo a área considerada foi a de um círculo de diâmetro 400 μ m, igual à abertura do colimador de tungstênio localizado próximo à face do detector; E_c é a energia para cada canal; $\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)$ é o coeficiente de transferência de energia em massa para o CdTe; e t_e é o tempo de exposição do detector ao feixe de raios X; f_{cl} é o fator de correção para a corrente anódica utilizada.

$$\phi_{Ec} = \frac{N(E_c)}{A} \quad (4.4)$$

Os fatores de correção para corrente anódica utilizada consistem na relação entre os parâmetros utilizados na espectrometria e os implementados para as qualidades de radiação do LCI/IPEN, ou seja, o f_{cl} é a razão entre a corrente utilizada e a corrente estabelecida para a qualidade. Esta correção concorda com a linearidade da resposta dos detectores semicondutores.

Para o cálculo da taxa de kerma, primeiramente foi obtida a curva do coeficiente de transmissão de energia em massa do CdTe versus energia

do fóton, utilizando os valores de $\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)$ disponíveis em NIST (2017), mas como estes dados não contemplam a mesma variação dentro do intervalo energético utilizado, foi feito o ajuste de uma função exponencial e os coeficientes desta foram utilizados para calcular os coeficientes de transmissão de energia em massa para o intervalo energético utilizado neste estudo.

4.8 Validação da metodologia

Para realizar a validação da metodologia abordada neste trabalho, foi realizada a calibração de um conjunto dosimétrico da Radcal, modelo 9015, com a câmara de ionização de 6 cm³ para as qualidades de radiação de radiodiagnóstico convencional (RQR's 3, 5, 8 e 10).

Foram escolhidas as qualidades de radiodiagnóstico convencional devido à rastreabilidade existente no LCI/IPEN ao laboratório primário PTB, o que permite que se compare a carga coletada pela câmara padrão ao kerma obtido utilizando a espectrometria. Esta comparação fornece um coeficiente de confiabilidade da metodologia proposta, relacionando os resultados deste estudo ao coeficiente de calibração (N_{cal}) fornecido pelo PTB no certificado de calibração dos padrões secundários do LCI/IPEN.

As medições foram realizadas com distância foco-detector de 1 m e com os parâmetros de qualidade idênticos aos apresentados na TAB. 4.1 para as qualidades de radiação de radiodiagnóstico convencional. Foram realizadas ainda medições com o padrão secundário de 6 cm³ para comparar os fatores de calibração deste com o obtido para o Radcal 9015.

Tanto para o conjunto Radcal 9015, quanto para o padrão secundário foi realizada a correção de temperatura e pressão. Foram realizadas 5 medições com tempo de coleta de 15 s, para o padrão, e para o Radcal as medições foram realizadas em modo taxa de dose.

Os parâmetros do equipamento de raios X, para as medições com o CdTe, foram ajustados conforme descrito na TAB. 4.3 e as configurações do detector mantidas as mesmas para o cálculo do kerma, com 512 canais.

As incertezas foram propagadas conforme JCGM (2008), que orienta como calcular e apresentar os valores das incertezas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Posicionamento dos espectrômetros.

O posicionamento dos sistemas de detecção foi projetado para que fosse reproduzível durante o período de desenvolvimento deste trabalho. Porém, o posicionamento dos sistemas de espectrometria teve que ser desenvolvido a partir das dificuldades encontradas:

- Alinhamento com o feixe primário de radiação;
- Colimação devido às altas taxas de radiação, e
- Diferença de diâmetros dos detectores.

O sistema de alinhamento do colimador desenvolvido durante a execução deste trabalho para o HPGe foi confeccionado pela oficina mecânica do IPEN. A configuração do colimador foi desenvolvida visando que tanto o apoio do colimador quanto o detector ficassem na mesma base, minimizando desvios oriundos do desnível entre eles. Foi utilizado alumínio, tanto para base quanto para o suporte do cilindro colimador, conforme apresentado na FIG. 5.1B.

FIGURA 5.1 – (A) Arranjo experimental pré-existente no LCI/IPEN para o detector de HPGe. (B) Arranjo experimental desenvolvido na execução deste trabalho.

Para o detector de CdTe não havia um sistema de alinhamento desenvolvido para uso no LCI/IPEN. No conjunto de acessórios do detector consta apenas um tripé, que não garante reprodutibilidade e ainda apresenta instabilidade na montagem, logo, foi necessário buscar alternativas para substituí-lo. A partir de uma visita ao laboratório de dosimetria do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (LD/IFUSP) foi possível adaptar a solução dada no laboratório para a realidade do LCI/IPEN. Utilizando um goniômetro para poder alinhar o orifício do colimador com o laser, vide FIG. 4.6, e uma mesa elevadora que é fixada ao carrinho de posicionamento do sistema de raios X utilizando parafusos, garantindo a reprodutibilidade no posicionamento, foi possível estabelecer um sistema prático e confiável para as medições realizadas. O arranjo desenvolvido para este trabalho está apresentado na FIG. 5.2B.

FIGURA 5.2 – (A) Suporte pertencente ao conjunto da Amptek com calço de PMMA (B) Arranjo experimental adquirido para a execução deste trabalho.

5.2 Aplicabilidade dos detectores

A proposta inicial deste trabalho era a de coletar os espectros com os dois sistemas abordados no item anterior, porém, como a intenção é que, futuramente, se possa aplicá-lo em outros laboratórios, fez-se o estudo de resposta dos detectores para saber a viabilidade desta aplicação.

Os espectros obtidos neste estudo tiveram caráter meramente confirmatório para o tempo morto de aquisição, logo não foi privilegiada a qualidade dos espectros sequer a estatística de contagens; como havia interesse no aumento da taxa de dose do feixe de raios X, foi utilizado o tempo de aquisição de apenas 5 s e os demais parâmetros foram alterados, conforme apresentado na TAB. 5.1.

Os espectros coletados inicialmente são apresentados nas FIG. 5.3 e 5.4, para os detectores de HPGe e CdTe, respectivamente.

TABELA 5.1 – Parâmetros utilizados para aquisição dos espectros no estudo de resposta dos detectores de HPGe e CdTe.

Detector	Tensão de pico do tubo (kVp)	Corrente anódica (mA)	Distância utilizada (m)	Taxa de dose obtida (kcps)
HPGe	50	0,5	1,93	0,18
		1,0		0,35
		2,0		0,66
		4,0		1,23
		5,0		1,73
	70	0,1	1,93	0,40
		0,5	2,12	1,80
CdTe	30	0,5	1,0	0,048
		1,0		0,086
		2,0		0,167
		4,0		0,335
		8,0		0,661
		10,0		0,821
	50	0,5	1,0	0,351
		1,0		0,667
		2,0		1,342
		4,0		2,687
		8,0		5,281
		10,0		6,589
	70	0,5	1,0	0,846
		1,0		1,646
		2,0		3,371
		4,0		6,543
		8,0		13,068
		10,0		16,321
	100	0,5	1,0	2,618
		1,0		5,214
		2,0		10,345
		4,0		20,313
		8,0		40,187
		10,0		49,658

FIGURA 5.3 – Espectros obtidos com HPGe para feixes de energia de 50 keV e 70 keV, respectivamente para diferentes taxas de contagem.

Para o HPGe, devido ao volume ativo do detector ser consideravelmente maior que o CdTe e ocasionar uma maior sensibilidade a feixes de radiação mais intensos, aumentando o intervalo de tempo para que o detector conte dois eventos próximos, ou seja, aumentando o tempo morto, por isso, não foi possível adquirir espectros com taxas maiores para as condições de medição apresentadas na TAB. 5.1, para este detector.

FIGURA 5.4 – Espectros obtidos com CdTe para feixes de energia de 30 keV, 50 keV, 70 keV e 100 keV respectivamente, e com diferentes taxas de contagens.

O tempo morto de resposta dos detectores foi representado em função da taxa de contagens, FIG. 5.5 e 5.6.

FIGURA 5.5 – Resposta em tempo morto do detector de HPGe à taxa de contagens com linha de corte de tempo morto igual a 5%.

FIGURA 5.6 – Resposta em tempo morto do detector de CdTe à taxa de contagens com linha de corte de tempo morto igual a 5%.

Analizando as FIG 5.5 e 5.6, percebe-se que o detector de CdTe consegue processar taxas mais altas de radiação X, até ≈ 40 kcps, enquanto o detector de HPGe apresenta tempo morto superior a 5% com taxas próximas a 2 kcps. Este fato dificulta a realização de medidas de feixes em outros laboratórios, que não dispõem de espaço físico suficiente para aumentar a distância foco-detector.

O HPGe apresenta esta limitação tanto pelo maior volume do detector (FIG. 5.7), o que aumenta a sua sensibilidade, quanto pela eletrônica que tem um tempo de processamento estabelecido no intervalo de grandeza de ms - μ s, contra um intervalo de μ s a ns do detector de CdTe.

FIGURA 5.7 – Comparação do tamanho dos detectores HPGe e CdTe, com destaque para as respectivas janelas.

Além das restrições de medição do HPGe, há o inconveniente fato da necessidade de resfriamento do detector com nitrogênio líquido, o que dificulta a utilização em campo, junto com a elevação do custo de operação do detector. Por estes motivos, foi decidido trabalhar apenas com o detector de CdTe.

5.3 Calibração em energia do CdTe

A calibração em energia realizada com as fontes de ^{241}Am e ^{152}Eu foi realizada com duas configurações: a primeira com 4096 canais e a segunda com 512 canais. O sistema foi configurado para o menor tempo de processamento de pulsos possível ($0,2\ \mu\text{s}$), para ambas as calibrações. Os espectros coletados para esta calibração são apresentados nas FIG. 5.8 e 5.9.

FIGURA 5.8 – Espectro em 4096 canais do ^{241}Am medido com CdTe e sinalizando os picos utilizados para calibração em energia.

FIGURA 5.9 – Espectro em 4096 canais do ^{152}Eu medido com CdTe e sinalizando o pico utilizado para calibração em energia.

Os pontos de relação entre o centróide do fotopico, fornecidos pelo software ADMCA, da Amptek, juntamente com os parâmetros do ajuste linear, com incerteza de fator de abrangência, $k=1$, isto é nível de confiança de 68% (1σ), são apresentados nas FIG. 5.10 e 5.11

FIGURA 5.10 – Curva de ajuste linear para calibração em energia do detector de CdTe (com 4096 canais) com valor dos parâmetros e respectivas incertezas.

Esta calibração apresentada na FIG. 5.10 foi seguida para todos os espectros medidos com a finalidade de verificação da tensão de pico do tubo, pois com esta resolução de $(0,04290 \pm 0,00018)$ keV é possível obter-se maior precisão na determinação do *endpoint*.

FIGURA 5.11 – Curva de ajuste linear para calibração em energia do detector de CdTe (com 512 canais) com valor dos parâmetros e respectivas incertezas.

Esta calibração possibilitou que o intervalo energético utilizado neste trabalho (20 a 150 keV) ficasse dentro dos 300 canais iniciais do espectro, facilitando que a correção dos espectros seja feita sem aumento das contribuições de incerteza. Segundo Morales (2007) quando se utiliza uma resolução espectral diferente da obtida para a função resposta, deve-se truncar intervalos energéticos para aproximar esta resolução, ocasionando perda de informação, além de um tempo de processamento maior.

5.4 Medição dos espectros

A medição dos espectros foi feita conforme explicado na seção anterior com duas configurações e finalidades diferentes; em primeiro momento foram medidos os espectros com intuito de averiguar a tensão de pico do equipamento de raios X, em seguida foram realizadas as medições dos espectros utilizados para o cálculo do kerma.

5.4.1 Obtenção da tensão de pico utilizando espectrometria

Para a obtenção da tensão de pico utilizando a espectrometria foi aplicada a metodologia do *endpoint*, onde os espectros foram extrapolados linearmente, na parte de alta energia, e o ponto de intersecção entre a reta e o eixo horizontal foi obtido.

As tensões de pico investigadas foram as utilizadas para as qualidades implantadas no LCI/IPEN. Para cada tensão de pico foram coletados espectros com o objetivo de obter o valor de tensão usando a metodologia do *endpoint* com uma tolerância de até 1,5% do valor nominal para a qualidade implantada. Os espectros obtidos para cada tensão de pico de referência são apresentados nas FIG 5.12 a 5.20.

FIGURA 5.12 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 28 kVp.

FIGURA 5.13 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 35 kVp.

FIGURA 5.14 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 50 kVp.

FIGURA 5.15 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 60 kVp.

FIGURA 5.16 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 70 kVp.

FIGURA 5.17 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 80 kVp.

FIGURA 5.18 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 100 kVp.

FIGURA 5.19 – Espectro experimental com extrapolação da cauda e ajuste linear para a tensão de pico de referência de 120 kVp.

TABELA 5.2 – Tensões de pico obtidas pelo método do *endpoint* para verificação da tensão nominal do equipamento de raios X.

Tensão de referência (kVp)	Tensão nominal (kVp)	<i>Endpoint</i> (keV)	Erro relativo (%)
28	28	29,53	5,5
	27	28,58	2,1
	26	27,9	0,4
35	35	36,81	5,2
	34	35,62	1,8
	33	34,51	1,4
50	50	51,8	3,6
	49	50,78	1,6
	48	49,47	1,1
60	60	61,75	2,9
	59	60,93	1,6
	58	59,39	1,0
70	70	71,56	2,2
	69	70,62	0,9
80	80	82,01	2,5
	79	81,2	1,5
	78	80,02	0,02
100	100	101,77	1,8
	99	100,49	0,5
120	120	121,90	1,6
	119	120,69	0,6
150	150	150,03	0,03

O motivo da existência dos erros obtidos foi investigado e apurou-se que houve uma troca do resistor que atua como divisor de tensão, porém não houve uma medição da tensão de pico com espectrometria na época podendo ter sido a causa dos erros obtidos. Percebe-se ainda que para os valores de tensão de pico < 100 kVp obteve-se maior variação, devido aos menores valores absolutos da tensão de referência sugerindo a necessidade de um ajuste no gerador de raios X. Durante a execução deste trabalho não foi possível o contato com o fabricante para a realização deste ajuste.

Considerando o exposto, foi decidido realizar a correção manual no painel de comando do equipamento de raios X. Para esta correção, foram escolhidos os valores de tensão que estiveram dentro do intervalo de $\pm 1,5\%$ em relação aos valores de referência conforme demonstrado na TAB. 5.2. Estes valores foram adotados para todas as medições realizadas neste trabalho.

5.4.2 Medição dos espectros primários para cálculo do kerma

Nesta etapa os espectros coletados foram comparados com espectros teóricos, que simulam o feixe que sai do tubo de raios X, independente do detector utilizado, esta comparação permite avaliar se a filtração está de acordo com a literatura, através de parâmetros como largura do espectro e posição do pico característico. Os espectros teóricos foram obtidos utilizando o programa Spekcalc[®].

Os espectros obtidos experimentalmente comparados aos teóricos fornecidos pelo simulador Spekcalc[®] são apresentados nas FIG 5.21 a 5.31. As contagens em cada espectro foram normalizadas pelo número máximo de contagens para cada espectro.

FIGURA 5.21 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc[®] para a qualidade RQR-3

FIGURA 5.22 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc[®] para a qualidade RQR-5

FIGURA 5.23 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc® para a qualidade RQR-8

FIGURA 5.24 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc® para a qualidade RQR-10

FIGURA 5.25 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc[®] para a qualidade RQT-8

FIGURA 5.26 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc[®] para a qualidade RQT-9

FIGURA 5.27 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc® para a qualidade RQT-10

FIGURA 5.28 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc® para a qualidade ISO-60N

FIGURA 5.29 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc® para a qualidade ISO-80N

FIGURA 5.30 – Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc® para a qualidade ISO-100N

FIGURA 5.31– Espectro experimental comparado ao obtido com o simulador Spekcalc[®] para a qualidade ISO 150N

A análise dos espectros obtidos experimentalmente comparados aos fornecidos pelo programa simulador de espectros teóricos remete à contribuição dos processos de interação da radiação com o detector, onde se percebe uma grande diferença na parte inicial do espectro, com o experimental, esta diferença será explicada na próxima seção, quando se aborda a função resposta.

5.5 Simulação pelo método de Monte Carlo

Para verificar se a geometria descrita na FIG. 5.32, obtida por simulação pelo método de Monte Carlo, estava de acordo com o detector, foi simulada a sua resposta a uma fonte de ^{241}Am , com intervalo de energia de 1 keV a 150 keV e variação de 1 keV. Antes de realizar a simulação da fonte radioativa foi necessário fornecer os parâmetros de entrada da Eq. 4.1, que relaciona a FWHM com a energia do fotopico. Para isto, foi gerado um ajuste não linear no programa Origin e os parâmetros obtidos, incluídas as incertezas, são apresentados na TAB. 5.3.

FIGURA 5.32- Vista do cenário computacional indicando a geometria dos principais componentes do detector XR-100-T da Amptek.

TABELA 5.3- Parâmetros obtidos por ajuste não linear da Eq. 4.1 com o programa Origin 8.0, com indicação das incertezas.

Parâmetro	Valor	Incerteza
A	0,44063	0,02014
B	0,05894	0,00504
C	0,0030	0,0014

O ajuste obteve um valor de χ^2 de 0,99939e χ_{red}^2 igual a $3,78 \cdot 10^{-5}$, sendo considerado estatisticamente um bom ajuste.

Após a modelação do cenário computacional incluindo todas as informações da geometria do detector e de parâmetros da fonte, foram feitos os primeiros ensaios com 10^9 histórias de partículas. Foi utilizado o *tally F8* que retorna valores em pulsos. Em todas as situações o erro relativo foi inferior a 10%.

A FIG 5.33 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e por simulação.

FIGURA 5.33– Comparação entre espectro experimental e simulado por MCNPX para a fonte de ^{241}Am .

Como pode ser verificado na FIG. 5.33, os resultados concordam razoavelmente, validando a modelagem computacional. Após esta etapa, foi simulada a função resposta do detector que representa a eficiência intrínseca do detector além da fração de escape dos raios X do volume sensível do detector. Esta função resposta foi obtida através da simulação de picos monoenergéticos, variando em intervalos de 0,5 keV na faixa de 0,5 a 150 keV, resultando em uma matriz quadrada de 300x300 (colunas x linhas).

A FIG 5.34 apresenta quatro respostas simuladas do detector para picos monoenergéticos de 30, 50, 120 e 140 keV.

FIGURA 5.34– Resposta normalizada simulada, por MCNPX, do detector CdTe para picos monoenergéticos de 30, 50, 120 e 140 keV

Analisando a FIG 5.34 observa-se que a resposta para um pico monoenergético não se limita à faixa de energia exata deste pico, ou seja, devido aos efeitos de absorção incompleta do fóton e à interação com elétrons de camadas mais externas, liberando energia menor que a do fotopico, obtém-se resposta em regiões energéticas menores que a do estímulo monoenergético. Esta análise possibilita entender que quanto maior a energia que chega ao detector, maiores serão as contribuições para as energias menores que a incidente.

Na análise dos resultados obtidos na seção anterior observou-se que com o aumento da energia máxima do feixe os espectros experimentais resultantes ficam mais distantes dos teóricos; isso se dá pela falta da correção da resposta do detector, por uma função resposta ou curva de eficiência de detecção. Quando a energia é aumentada, o detector acaba perdendo a informação, seja por falta de interação no volume sensível ou pelo empilhamento dos pulsos, que nada mais é que uma limitação no

processamento dos fótons que incidem no detector, ocasionado pela maior intensidade do feixe.

5.6 Correção dos espectros

A correção dos espectros foi realizada em duas etapas, a primeira foi a obtenção da função resposta, matriz **R**, do detector de CdTe utilizando o MCNPX, a segunda etapa consistiu na realização da operação de matrizes estabelecida na Eq. 4.1. Tanto a matriz $\mathbf{R}^{-1}$ quanto a matriz **A**, foram obtidas utilizando o programa desenvolvido por Moralles (MORALLES, 2007) e gentilmente cedido para a realização das correções neste trabalho.

Para conseguir realizar a inversão da matriz **R**, foi necessário reduzir o tamanho da matriz função resposta original devido à condição de não singularidade, necessária à inversão. Foram descartadas as respostas referentes ao intervalo energético de 0,5 a 4,5 keV resultando numa matriz de 291 x 291.

Como a calibração foi feita com a mesma resolução energética que a simulação, não foram necessárias técnicas de truncamento de canais para a multiplicação da matriz $\mathbf{R}^{-1}$ pela matriz **B**.

Os espectros corrigidos são apresentados nas FIG. 5.35 a 5.45

FIGURA 5.35 – Espectro corrigido para a qualidade RQR 3 comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.36 – Espectro corrigido para a qualidade RQR 5 comparado ao experimental e ao teórico.

FIGURA 5.37 – Espectro corrigido para a qualidade RQR 8 comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.38 – Espectro corrigido para a qualidade RQR 10 comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.39 – Espectro corrigido para a qualidade RQT 8 comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.40 – Espectro corrigido para a qualidade RQT 9 comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.41 – Espectro corrigido para a qualidade RQT 10 comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.42 – Espectro corrigido para a qualidade ISO 60N comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.43 – Espectro corrigido para a qualidade ISO 80N comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.44 – Espectro corrigido para a qualidade ISO 100N comparado ao espectro experimental e ao teórico.

FIGURA 5.45 – Espectro corrigido para a qualidade ISO 150N comparado ao espectro experimental e ao teórico.

As correções realizadas apresentaram boa concordância com os espectros teóricos disponíveis nos programas utilizados para comparação. A grande diferença apresentada no espectro corrigido da qualidade de radiação ISO 150N (FIG. 5.45) indica uma possível inconsistência da correção para um feixe com filtração tão pesada. Estes resultados demonstram que a simulação da função resposta foi validada e apresenta-se como uma alternativa ao cálculo da eficiência experimental.

5.7 Cálculo das taxas de kerma utilizando a espectrometria

Para calcular a taxa de kerma é necessário em primeiro lugar obter a curva do coeficiente de transferência de energia em massa no material do detector para o intervalo de energia de interesse. Estes dados são fornecidos em NIST (2016), porém a variação de energia não é a mesma. Portanto, deve-se adotar um ajuste exponencial para os pontos ou fazer a interpolação destes. Neste trabalho optou-se pelo ajuste exponencial dos pontos apresentados na FIG. 5.46.

FIGURA 5.46 – Dados do NIST (2016), linha preta, com ajuste exponencial, linha vermelha, para os dados do coeficiente de transmissão de energia em massa no detector de CdTe.

O ajuste foi realizado por uma função não linear de decaimento exponencial com deslocamento, apresentada na Eq. 5.1. Os valores dos parâmetros obtidos, junto com as respectivas incertezas, são apresentados na TAB. 5.4.

$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} + A_2 \cdot e^{(-x/t_2)} + A_3 \cdot e^{(-x/t_3)} \quad (5.1)$$

TABELA 5.4 – Parâmetros do ajuste polinomial obtido com o Origin 8.0 para os dados do NIST (2016) com as respectivas incertezas para uma probabilidade de abrangência de 68% (1σ).

Parâmetro	Valor	Incerteza
y_0	0,0253	9,61732E-4
A_1	3,5750	0,3552
t_1	8,96134	0,27285
A_2	967,42275	33,11902
t_2	1,30792	0,01999
A_3	74,09418	5,01768
t_3	3,14514	0,07832

Como as medições foram feitas com corrente anódica diferente das usualmente utilizadas durante a calibração, foi necessário aplicar um fator de correção, vide Eq. 4.3 para a corrente anódica, f_i , baseado na proporcionalidade estabelecida entre as grandezas corrente e taxa de contagens. Para assegurar que a aplicação deste fator não introduziria um erro aos resultados de kerma, foi realizado um estudo de linearidade da resposta do detector para diferentes tensões de pico. Neste estudo, foi variada a corrente anódica e as taxas de contagens do espectro contínuo de raios X foram obtidas. Os resultados do estudo de linearidade para o CdTe são apresentados na FIG. 5.47, para cada tensão de pico estudada na seção 5.1, com ajuste linear.

FIGURA 5.44 – Estudo da linearidade de resposta na espectrometria com o detector de CdTe em diferentes tensões de pico

Comprovando a linearidade do detector foi possível aplicar o fator de correção f_i para a Eq. 4.3 e obter-se a taxa de kerma gerada no volume sensível do detector. As incertezas para a taxa de kerma foram calculadas observando-se a estatística de contagens, para os dados do espectro experimental; a propagação da incerteza para o ajuste linear da calibração em energia; a incerteza declarada pelo NIST (2016) para o coeficiente de transferência de energia em massa, máximo de 4%; as incertezas do ajuste exponencial, e para o espectro corrigido foram levadas em consideração o erro da simulação da função resposta (máximo de 10%). Os resultados das taxas de kerma obtidas com as câmaras de ionização padrão do LCI/IPEN e utilizando a espectrometria, experimental e corrigida, são apresentados na TAB 5.5.

TABELA 5.5 – Taxas de kerma no ar calculadas a partir da espectrometria e comparadas às obtidas por medições com as câmaras de ionização padrão. Incertezas para um fator de abrangência $k=1$.

Qualidade do feixe	Câmara de ionização padrão (mGy/min)	Espectro experimental (mGy/min)	Espectro corrigido (mGy/min)
RQR-3	$18,95 \pm 0,5$	$16,07 \pm 0,10$	$18,71 \pm 0,12$
RQR-5	$35,15 \pm 0,9$	$33,87 \pm 0,21$	$39,15 \pm 0,25$
RQR-8	$65,18 \pm 1,5$	$70,7 \pm 0,4$	$62,5 \pm 0,4$
RQR-10	$115,8 \pm 2,6$	$113,8 \pm 0,7$	$112,2 \pm 0,7$
RQT-8	$22,0 \pm 0,5$	$25,4 \pm 0,3$	$21,9 \pm 0,21$
RQT-9	$34,0 \pm 0,8$	$41,24 \pm 0,25$	$33,8 \pm 0,28$
RQT-10	$57,0 \pm 1,3$	$54,0 \pm 0,3$	$56,7 \pm 0,4$
ISO-60N	$(33,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$	$(49,7 \pm 3) \cdot 10^{-2}$	$(33,52 \pm 0,23) \cdot 10^{-2}$
ISO-80N	$(17,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$	$(16,86 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$	$(17,71 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$
ISO-100N	$(8,22 \pm 0,18) \cdot 10^{-3}$	$(8,42 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$	$(8,26 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$
ISO-150N	$(70,4 \pm 1,6) \cdot 10^{-2}$	$(69,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$	$(72,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$

Os valores calculados utilizando a espectrometria apresentam boa concordância com os obtidos com as câmaras de ionização padrão do LCI/IPEN, demonstrando que o método apresenta fortes indícios de viabilidade de uso para a medição das taxas de referência de feixes de radiação X, sendo as incertezas obtidas de grande contribuição para a confiabilidade metrológica dos resultados, devido, principalmente, aos poucos fatores de contribuição para a incerteza de medição.

5.8 Validação da metodologia

Como o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protocolo de calibração, ele precisa ser submetido à validação da metodologia desenvolvida, para assegurar que está apto a ser implementado. Para esta validação foi realizada uma comparação entre o método desenvolvido neste trabalho, utilizando espectrometria, e o método da substituição com padrão calibrado.

Seguindo o procedimento de ensaio de calibração em feixes de radiação X estabelecidos no LCI/IPEN, foi utilizado o método da substituição com duas câmaras de ionização de 6 cm³ sendo uma de uso comercial, Radcal modelo 9015, e a outra desenvolvida para laboratórios de calibração.

As medições foram realizadas a 1 m do ponto focal para as qualidades de radiação de radiodiagnóstico convencional (RQR's 3, 5, 8 e 10). Foram realizadas cinco medições para cada câmara de ionização, as leituras foram corrigidas pelo fator de temperatura e pressão ($F_{t,p}$), as leituras do padrão também foram corrigidas para os coeficientes de calibração ($N_k = 4,623 \cdot 10^6$ Gy/C) e de qualidade do feixe de radiação (k_q) declarados em certificado fornecido pelo PTB. Para se obter o kerma no ar, para o padrão, deve-se seguir a Eq 5.2:

$$K_{ar} = M \cdot N_k \cdot k_q \cdot f_{t,p} \quad (5.2)$$

onde M é a leitura em carga do padrão secundário (em Coulomb).

Seguindo a metodologia descrita nas seções anteriores, foram realizadas as medições dos espectros com o detector de CdTe, com exceção da configuração dos parâmetros do equipamento de raios X que foram ajustados, conforme TAB 4.3.

Os valores obtidos para esta comparação são apresentados nas TAB 5.6 e 5.7.

TABELA 5.6 – Taxas de kerma no ar obtidas na calibração da câmara de ionização, Radcal 9015, contra o padrão do LCI/IPEN com fator de calibração obtido e incertezas padrão para um fator de abrangência $k=1$.

Qualidade de radiação	K_{ar} obtido com o padrão (mGy/min)	Leitura corrigida do Radcal 9015 (mGy/min)	Fator de calibração padrão x Radcal 9015 (N_{cal})
RQR 3	$19,0 \pm 0,6$	$18,9 \pm 1,0$	0,9758
RQR 5	$35,2 \pm 1,1$	$35,1 \pm 1,8$	0,9838
RQR 8	$64,9 \pm 1,9$	65 ± 3	0,9932
RQR 10	$115 \pm 3,0$	115 ± 6	0,9995

Na TAB. 5.6 encontram-se dados de uma calibração conforme o método vigente no LCI/IPEN, onde são comparadas as respostas corrigidas de duas câmaras de ionização, sendo uma delas o instrumento padrão do laboratório. A partir da relação entre os resultados de medição, obtém-se o fator de calibração (adimensional) para que os resultados do instrumento calibrado possam ser corrigidos com rastreabilidade à grandeza do sistema internacional de grandezas e unidades (SI), kerma no ar.

TABELA 5.7 – Taxas de kerma no ar obtidas na calibração da câmara de ionização, Radcal 9015, contra a metodologia da espectrometria com fator de calibração obtido e incertezas padrão para um fator de abrangência $k=1$.

Qualidade de radiação	Taxa de kerma obtida com o espectro experimental (mGy/min)	Taxa de kerma obtida com o espectro corrigido (mGy/min)	Leitura corrigida do Radcal 9015 (mGy/min)	Fator de calibração padrão x Radcal 9015 (N_{cal}) experimental	Fator de calibração padrão x Radcal 9015 (N_{cal}) corrigido
RQR 3	$16,07 \pm 0,10$	$18,71 \pm 0,12$	$18,9 \pm 1,0$	0,8503	0,9899
RQR 5	$33,87 \pm 0,21$	$39,15 \pm 0,25$	$35,1 \pm 1,8$	0,9649	1,1154
RQR 8	$70,7 \pm 0,4$	$62,5 \pm 0,4$	65 ± 3	1,0827	0,9615
RQR 10	$113,8 \pm 0,7$	$112,2 \pm 0,7$	115 ± 6	0,9895	0,9757

Os resultados obtidos para os fatores de calibração apresentam boa concordância entre os dois métodos, colaborando com a viabilidade da adoção da metodologia proposta neste estudo, para a calibração de instrumentos em feixes de radiação X, apresentando um valor de incerteza aceitável para um laboratório padrão secundário (0,62 %, para $k=1$, e 1,14% para $k=2$).

Por conseguinte, foram comparados os valores de kerma obtidos pelo método espectrométrico com as leituras de carga coletadas com o padrão LCI/IPEN; a razão destas grandezas fornece um fator que pode ser comparado ao coeficiente de calibração (N_k) que é apresentado no certificado de calibração. Indiretamente, através desta razão, pode-se comparar o kerma obtido com a espectrometria ao kerma obtido no laboratório primário. Este valor de N_k está relacionado com o fator da qualidade da radiação (k_q), que representa uma normalização para uma qualidade de referência, para as qualidades de radiodiagnóstico a qualidade de referência é a RQR 5. Assim o N_k obtido para uma determinada qualidade é igual ao N_k declarado multiplicado pelo k_q daquela qualidade de radiação.

Os resultados para os coeficientes de calibração do padrão (N_{kPTB}), do espectro experimental (N_{kEXP}) e do espectro corrigido (N_{kCOR}), para cada qualidade, bem como as diferenças percentuais entre os valores obtidos por espectrometria e com o padrão do LCI/IPEN, são apresentados na TAB 5.8.

TABELA 5.8 – Coeficientes de calibração N_k para o padrão, declarado em certificado (incerteza de 0,38%, para $k=1$); para o cálculo do kerma com o espectro experimental, comparado à coleta de cargas da câmara padrão (incerteza de 0,62%, para $k=1$), e para o cálculo do kerma com o espectro corrigido, comparado à coleta de cargas da câmara padrão (incerteza de 0,62%, para $k=1$).

Qualidade de radiação	N_{kPTB} (Gy/C)	N_{kEXP} (Gy/C)	N_{kCOR} (Gy/C)	$(N_k)_{Exp}/$ $(N_k)_{PTB}$ (%)	$(N_k)_{Cor}/$ $(N_k)_{PTB}$ (%)
RQR 3	4.61E+06	3.91E+06	4.56E+06	15,31	1,32
RQR 5	4.62E+06	4.45E+06	5.15E+06	3,5	11,6
RQR 8	4.65E+06	5.04E+06	4.46E+06	9,3	3,4
RQR 10	4.65E+06	4.58E+06	4.50E+06	0,8	2,5

Os valores obtidos utilizando a espectrometria apresentaram, no geral, boa concordância com os calculados com as informações do certificado de calibração, entretanto para as tensões de pico mais baixas houve maior discordância, para a RQR 3 que teve 15,31% de diferença podem ser atribuídas as interações da radiação com a matéria que distorceram muito o espectro obtido, pois trata-se somente de radiação de freamento. Para a RQR 5 corrigida, não houve uma conclusão do motivo da grande diferença entre os coeficientes de calibração, uma vez que os procedimentos de correção do espectro foram idênticos aos adotados para as demais qualidades, não foi possível chegar a uma conclusão. Mais estudos em relação à correção dos espectros devem ser realizados.

Apesar das diferenças obtidas, pode-se dizer que o método possui grande potencial de implementação; uma das circunstâncias que baliza esta possibilidade são os baixos valores de incerteza relativa encontrados, por ser um método absoluto, consegue-se dizer que é comparável ao método de calibração em um laboratório primário. Ainda justificando a possibilidade de implantação do método está a necessidade do laboratório em assegurar que os instrumentos estão apresentando resposta condizente com os certificados de calibração, servindo como uma verificação periódica, que é exigida na ISO (2005).

6 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados se apresentaram de acordo com os objetivos previstos, com a utilização do detector de CdTe que é muito versátil em seu uso de fácil posicionamento e manuseio, além da boa capacidade de resolução em altas taxas de radiação e baixo custo de operação

Foi possível contornar um dos maiores problemas em espectrometria, que é o posicionamento do detector, com soluções relativamente simples e altamente reprodutíveis, facilitando a continuação e aprofundamento deste trabalho, não esquecendo que essa conquista foi alcançada graças ao bom sistema de alinhamento por lasers, que está muito bem alinhado com o feixe de raios X.

O uso do código MCNPX para a obtenção da função resposta foi uma boa alternativa às complicadas considerações experimentais disponíveis na literatura, fator que contribuiu consideravelmente para a obtenção de incertezas padrão relativas menores ($\approx 0,62\%$ da taxa de kerma, para $k=1$), necessárias para um alto nível de confiabilidade metrológica. Entretanto, identificou-se a necessidade de aprofundamento de estudos da função resposta, principalmente na RQR 5, onde se obteve uma diferença de 15%, quando o espectro foi corrigido pela função resposta, para o kerma calculado.

A espectrometria como instrumento de verificação das condições do feixe pontuou como um procedimento necessário a laboratórios onde há alto fluxo de pesquisadores, para assegurar as especificações do feixe de radiação X além de fornecer um controle de qualidade das condições do equipamento, fornece ainda dados a respeito da linearidade e filtração utilizada, podendo ser facilmente identificadas discrepâncias quando se compara os espectros experimentais aos teóricos.

As taxas de kerma obtidas com a espectrometria foram muito coerentes com os valores pré-estabelecidos com as câmaras de ionização, sendo os valores comparáveis aos do laboratório primário PTB, rastreável devido ao coeficiente de calibração que retoma ao valor medido pelo laboratório.

O protocolo foi estabelecido, porém como sugestão futura considera-se de grande valia a possibilidade de automatização da leitura e correção dos espectros para uma comparação com o padrão secundário, através de um software desenvolvido de maneira operacional e intuitiva.

Com a metodologia proposta de verificação periódica das características do feixe por espectrometria aliada à simulação pelo método de Monte Carlo, é possível manter a confiabilidade metrológica de um sistema de referência para a calibração de outros instrumentos. Deste modo as calibrações em laboratórios com qualidade metrológica superior ao praticado no LCI, pode ser em intervalos maiores, sem comprometer a confiança nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBENE, L.; GERARDI, G.; DELSORDO, S.; RASO G. Performance of a digital CdTe X-ray spectrometer in low and high counting rate environment. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research***, v. 621, p. 447-452, 2010.
2. ABBENE, L.; GERARDI, G.; PRINCIPATO, F.; DELSORDO, S.; RASO G.; Direct measurement of mammographic X-ray spectra with a digital CdTe detection system. ***Sensors*** 2012, v. **12**, p. 8390-8404, 2012.
3. ABBENE, L.; GERARDI, G.; PRINCIPATO, F. Real time digital pulse processing for X-ray and gamma ray semiconductor detectors. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A***, v. 730, p. 124-128, 2013a.
4. ABBENE, L.; GERARDI, G.; RASO, G.; BASILE, S.; BRAI, M., PRINCIPATO, F. Energy resolution and throughput of a new real time digital pulse processing system for x-ray and gamma ray semiconductor detectors. ***Journal of Instrumentation***, v. 8, 2013b.
5. ABBENE, L.; LA MANNA, A.; FAUCI, F.; GERARDI, G.; STUMBO, S.; RASO, G. X-ray spectroscopy and dosimetry with a portable CdTe device. ***Nucl. Instr. Meth. A***, v. 571, p. 373-377, 2007.
6. ALMEIDA JUNIOR, J.N.; TERINI, R.A.; HERDADE, S.B.; FURQUIM, T.A.C. Dosimetria de raios X em mamografia para combinação Mo/Mo utilizando espectrometria Compton. ***Rev. Imagem***, v. 32, p.13-19, 2010.

7. ALVARENGA, Tallyson Sarmiento. **Instalação e caracterização básica de um laboratório para testes de monitores portáteis com radiação de nêutrons.** 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.85.2014.tde-16062014-155542. Acessoem: 2017-05-21
8. ANKERHOLD, U.; BEHRENS, B.; AMBROSI, P. X-ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma, K_a , to personal dose equivalent, $H_p(10)$, for radiation qualities of the ISO narrow spectrum series. ***Radiat.Prot. Dosimetry***, v. 81, p. 247-258, 1999.
9. ANKERHOLD, U. X reference radiation qualities produced with tube voltages above 300 kV for the calibration and testing of dosimeters. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 123, p. 137-142, 2006.
10. ANTONIO, Patrícia de Lara. **Estabelecimento de padronização primária e de métodos relativos com o uso de técnicas luminescentes em dosimetria da radiação beta.** 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/T.85.2014.tde-31032014-145823. Acessoem: 2017-05-21.
11. ASSIAMAH, M.; NAM, T.L.; KEDDY, R.J. Comparison of mammography radiation dose values obtained from direct incident air kerma measurements with values from measured X-ray spectral data. ***Appl. Radiat. Isot.***,v. 52, p. 551-560, 2005.
12. ATTIX, F. H. (1986), *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*, John Wiley & Sons, Madison.
13. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria 453. Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico. Diário Oficial da União, Brasília, 1998. (Portaria nº 453, ANVISA).

14. BURNS, D.T.; BÜERMANN, L. Free-airionizationchambers. ***Metrologia***, v. 46, p. 9-23, 2009.
15. BUSHBERG, J.T.; SEIBERT, J.A.; LEIDHOLDT JUNIOR., E.M.; BOONE, J.M. ***The essential physics of medical imaging***.2ª.ed. Philadelphia: Lippincott Williams e Wilkins, 2002.
16. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Diretrizes básicas de proteção radiológica***. Rio de Janeiro: CNEN, 2014. (alteração do item 5.4.2.1), (CNEN-NN-3.01).
17. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Serviços de radioproteção***. Rio de Janeiro: CNEN, 1998. (CNEN-NE-3.02).
18. COMITÊ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO.
Comissão Nacional de Energia Nuclear. Instituto de Radioproteção e Dosimetria (CASEC, IRD, CNEN). ***Requisitos técnicos para certificação de laboratório de calibração de instrumentos de medição para radiação ionizante usados em radioproteção***. Rio de Janeiro: Jun. 2011. (RT-LCI-001/2011).
19. CORRÊA, E. L. ; SANTOS, L.R. ; VIVOLO, V. ; POTIENS, M P A. .
Mammography calibration qualities establishment in a Mo-Mo clinical system. In: METROLOGIA 2015, 2015, Bento Gonçalves. PROCEEDINGS METROLOGIA 2015. RIO DE JANEIRO: SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA, 2015. p. 1-4
20. CORRÊA, E L ; SANTOS, L R DOS ; VIVOLO, V ; POTIENS, M P A
Mammographycalibrationqualities establishment in a Mo- Moclinical system.
Journal of Physics. Conference Series (Online), v. 733, p. 012086, 2016.
21. GERARDI, G.; ABBENE, L.; LA MANNA, A.; FAUCI, F.; RASO, G. **Digital filteringandanalysis for asemiconductor X-ray detector data acquisition**.
Nucl. Instr. Meth. A, v. 571, p. 378-380, 2007.

22. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. ***Metrologia Científica***: estrutura hierárquica de rastreabilidade. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/estrutura.asp>>. Acesso em: 06 de Agosto de 2014.

23. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Dosimetry in diagnostic radiology***: an international code of practice. Vienna, 2007. (Technical reports series nº1457).

24. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Calibration of radiation protection monitoring instruments***. Vienna, 2000. (Safety Reports Series nº 16).

25. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***Medical Diagnostic Equipment***: radiation conditions for use in the determination of characteristics. 2^a ed., Geneva, 2005. (IEC 61267)

26. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: radiation characteristics and production methods***. Geneva, 1996. (ISO 4037-1).

27. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**. ABNT, NBR, ISO/IEC 17025. Rio de Janeiro 2005.

28. JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement**. JCGM, 2008. (JCGM 100).

29. KHARRATI, H.; ZARRAD, B. Computation of beam quality parameters for Mo/Mo, Mo/Rh, Rh/Rh, and W/AI target/filter combinations in mammography. ***Med. Phys.***, v. 30, p. 2638-2642, 2003.

30. KNOLL, G.F. ***Radiation detection and measurement***.3ª.ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

31. KORKOVA, D.; JUDAS, L. Correction of measured X-ray spectra by an analytical response matrix using Matlab. Disponível em:
<http://www2.humusoft.cz/www/papers/tcp2015/037_kurkova.pdf> Acesso em 2017-15-01.

32. LIMA, Mateus Hilário de. **Caracterização de uma câmara de ionização ar-livre em feixes diretos de raios X utilizados em mamografia**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.85.2014.tde-02052014-152732. Acesso em: 2017-02-01.

33. LOS ALAMOS LABORATORY. **MCNP**: A general Monte Carlo N-particletransportcode. Version5, Los Alamos NationalLaboratory, 2008.

34. LUCENA, Rodrigo Ferreira de. Implantação de um programa de controle **de qualidade em equipamentos de raios x por meio de medidores não invasivos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em:
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-29082011-162046/>>. Acessoem: 2014-08-10.

35. MAINARDI, R.T.; BONZI, E.V.An indirect method of X-ray spectra measurement by simultaneous attenuations of the scattered beam.***Radiation Physics and Chemistry***, v. 77, p. 537-544, 2008.

36. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST), X-Ray Mass Attenuation Coefficients. Disponível em:
<<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab4.html>>. Acesso em 2016 – 11- 02.

37. NEVES, Lucio Pereira. **Desenvolvimento e caracterização de câmaras de ionização cilíndricas como sistemas de referência para dosimetria de feixes de radiação de fótons.** 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. doi:10.11606/T.85.2013.tde-19112013-144350. Acesso em: 2017-05-21.

38. POTIENS JR., A.J. ; COSTA, N.A. ; SANTOS, L. ; CORRÊA, E. L. ; POTIENS, M. P. A. . **Comparison of a KAP meter and a PDC Behavior using Mathematical Simulation in Reference Diagnostic Radiology Qualities.** In: 9th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications, 2014, Valência. Proceedings of IRRMA9, 2014. p. 1-5.

39. SAITO, M. Dual-energy approach to contrast-enhanced mammography using the balanced filter method: Spectral optimization and preliminary phantom measurement. *Med. Phys.*, v. 34, p. 4236-4246, 2007.

40. SANTOS, L.R., VIVOLO, V., NAVARRO, M.V., POTIENS, M.P.A. Comparative study of semiconductors detectors to use in radiodiagnostic energy range. **1st International Conference on Dosimetry and its Applications: Book of Abstracts**, p 188, Prague. 2013. Disponível em: <<http://icda.fjfi.cvut.cz/abstracts-ICDA.pdf>>. Acesso em: 2014-01-08.

41. SEELENTAG, W. W.; PANZER, W.; DREXLER, G.; PLATZ, L.; SANTNER, F. **A Catalogue of Spectra Used for the Calibration of Dosemeters, GSF – Report S-560**, 1979.

42. SILVA, J.O. **Desenvolvimento de câmaras de ionização especiais para controle de qualidade em mamografia.** 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-04072013-172804/>>. Acesso em: 2014-10-02.

43. SILVA, Natália Fiorinida. **Estabelecimento de um sistema padrão primário para raios X de energias baixas com uma câmara de ionização de ar livre**. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-20042016-145431/>>. Acesso em: 2017-05-21.
44. TAUHATA, L.; RAMOS, M.M.O. **Grandezas e unidades para radiação ionizante**: recomendações e definições. Rio de Janeiro, R.J.: Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, 2011.
45. TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A.R. **Radioproteção e dosimetria**: fundamentos. 5ª rev. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003.
46. UFTPR (2016) Interações do ânodo. Disponível em: <<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo#raios-x-de-freamento>> (Acesso em 27/12/2016)
47. WOLBARST, A.B. **Physics of radiology**. Norwalk: Appleton& Lange, 1993.
48. YORIAZ, H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em física médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 31, p. 141-149, 2009.