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

**Desenvolvimento e caracterização de um detector do tipo TH-GEM para
metrologia das radiações ionizantes**

NATÁLIA FIORINI DA SILVA

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

**Orientadora:
Profa. Dra. Linda V. E. Caldas**

**São Paulo
2021**

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

**Desenvolvimento e caracterização de um detector do tipo TH-GEM para
metrologia das radiações ionizantes**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

NATÁLIA FIORINI DA SILVA

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

Orientadora:

Profa. Dra. Linda V. E. Caldas

São Paulo

2021

Fonte de Financiamento: Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

SILVA, N. F. d. ***Desenvolvimento e caracterização de um detector do tipo TH-GEM para metrologia das radiações ionizantes***. 2021. 107 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.
Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Natalia Fiorini da
Desenvolvimento e caracterização de um detector do tipo
TH-GEM para metrologia das radiações ionizantes / Natalia
Fiorini da Silva; orientadora Linda Viola Ehlin Caldas. -- São
Paulo, 2021.
107 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia
Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e
Nucleares, São Paulo, 2021.

1. Detector TH-GEM. 2. Metrologia das Radiações. 3. Feixes
Padronizados de Mamografia. I. Caldas, Linda Viola Ehlin,
orient. II. Título.

À memória de minha mãe, Maria Luiza Fiorini da Silva.

Agradecimentos

À Dra. Linda V. E. Caldas, pela orientação durante todo o desenvolvimento do projeto. Agradeço também pela paciência, disponibilidade e companheirismo, sempre exigindo o melhor de mim com carinho e atenção.

Aos meus pais Celso Manoel da Silva e Maria Luiza Fiorini da Silva, pelo amor, dedicação e suporte incondicional.

Aos meus irmãos Daniela e Tiago, aos meus cunhados Alessandro e Cristiane e às minhas sobrinhas Lorena, Ana Luiza e Olivia por todo carinho e incentivo.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI-IPEN), em especial à Dra. Maria da Penha de Albuquerque Potiens, ao Dr. Vitor Vivolo e ao Sr. Marcos Xavier, pela colaboração em diversas etapas do projeto.

A todos do Laboratório de Análises de Materiais com Feixes Iônicos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (LAMFI-USP), em especial ao Técnico Renan Ferreira de Assis, pela contribuição na produção mecânica do detector.

Ao grupo de pesquisa do *High Energy Physics Instrumentation Center* do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (HEPIC-USP), em especial ao Prof. Dr. Tiago Fiorini da Silva, por toda colaboração e suporte prestados durante todo o desenvolvimento deste projeto, e aos alunos: Lucas de Arruda Serra Filho, pelo auxílio nos testes de caracterização; Eduardo S. Palermo, pelos desenhos técnicos; e Thiago Badaro Saramela, pelas contribuições nas simulações.

Ao Dr. Hugo Natal da Luz, pela disponibilidade e auxílio prestado em diversas etapas do trabalho.

À Dra. Maysa Costa de Castro, pela colaboração no desenvolvimento do projeto. Agradeço também pela amizade e companheirismo durante todos esses anos de convivência.

Ao Dr. Felipe Belonsi de Cintra, pelas contribuições referentes às simulações.

Aos meus amigos, colegas e familiares.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/USP, na pessoa do Sr. Superintendente, Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo, por proporcionar toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento do projeto.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear, pelo auxílio financeiro.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, no projeto INCT em Metrologia das Radiações na Medicina, pelo auxílio financeiro nas participações em congressos.

Nenhum saber é saber completo.

Galileu Galilei

RESUMO

SILVA, N. F. **Desenvolvimento e caracterização de um detector do tipo TH-GEM para metrologia das radiações ionizantes**. 2021. 107 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN - CNEN/SP, São Paulo.

O campo de detectores gasosos microestruturados representa atualmente um setor de tecnologias em crescimento dinâmico, entre as quais os detectores do tipo TH-GEM (*THick Gas Electron Multiplier*) estão em destaque para uso em larga escala e aplicações generalizadas. As variações de detectores neste conceito têm sido utilizadas para dosimetria para diversos tipos de feixes de radiação e na produção de imagens. Com o intuito de contribuir com essa linha de pesquisa, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo com características adequadas para metrologia das radiações ionizantes de baixas energias (feixes padronizados de mamografia). Este estudo foi pautado em simulações para otimização das condições de detecção e do detector, construção de um protótipo e na sua caracterização experimental. Determinou-se, por simulação de Monte Carlo, a influência de cada componente do detector do tipo TH-GEM na energia depositada no volume sensível, obtendo-se os valores de 0,09% para o invólucro, 0,01% para a placa coletora e 44% para a placa de amplificação. A espessura de 6 mm de alumínio para a blindagem foi obtida para uma eficiência de 99%. A placa de amplificação construída consiste em uma placa de circuito impresso perfurada em um padrão hexagonal, com orifícios de $(0,254 \pm 0,021)$ mm de diâmetro e $(1,11 \pm 0,12)$ mm de distância entre eles. A placa de amplificação foi submetida à caracterização elétrica onde foram obtidos os valores de $(15,3 \pm 0,4)$ G Ω para resistência e de $(65,3 \pm 1,7)$ pS para condutância. Para a caracterização experimental o detector do tipo TH-GEM foi preenchido com a mistura de Ar/CH₄ na concentração 90/10. Foram obtidos experimentalmente valores para o ganho efetivo de $1,45 \pm 0,10$, $1,60 \pm 0,10$, $1,90 \pm 0,12$ e $2,20 \pm 0,10$ para as diferenças de potenciais aplicadas à placa de amplificação de 200 V, 300 V, 400 V e 450 V respectivamente. Além disso, foi possível verificar um comportamento linear da resposta do detector com a variação da corrente no tubo de raios X.

Palavras-chave: Detector TH-GEM, Metrologia das Radiações, Feixes Padronizados de Mamografia.

ABSTRACT

SILVA, N. F. **Development and characterization of a TH-GEM based detector for ionizing radiation metrology.** 2021. 107 p. Thesis (PhD in Nuclear Technology) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN - CNEN/SP, São Paulo.

The field of microstructured gaseous detectors currently represents a sector of technologies in dynamic growth, among which detectors of the type TH-GEM (*THick Gas Electron Multiplier*) are highlighted for use in large scale and generalized applications. The variations of detectors in this concept have been used for dosimetry for different types of radiation beams and in the production of images. To contribute to this research line, the objective of this work was the development of a prototype with adequate characteristics for metrology of low energy ionizing radiation (standardized mammography beams). This study was based on simulations to optimize the conditions of detection of the detector, construction of a prototype, and its experimental characterization. The influence of each component of the TH-GEM detector on the energy deposited in the sensitive volume was determined by Monte Carlo simulation, obtaining the values of 0.09% for the enclosure, 0.01% for the collecting plate, and 44% for the amplification plate. The thickness of 6 mm for the aluminum shield was obtained for an efficiency of 99%. The built-in amplification board consists of a printed circuit board perforated in a hexagonal pattern, with holes of (0.254 ± 0.021) mm in diameter and (0.11 ± 0.12) mm between them. The amplification plate was subjected to electrical characterization where the values of (15.3 ± 0.4) G Ω for resistance and (65.3 ± 1.7) pS for conductance were obtained. For the experimental characterization, the TH-GEM detector was filled with the mixture of Ar/CH₄ in the concentration 90/10. Values for the effective gain of 1.45 ± 0.10 , 1.60 ± 0.10 , 1.90 ± 0.12 , and 2.20 ± 0.10 were obtained experimentally for the potential differences applied to the amplification board of 200 V, 300 V, 400 V, and 450 V respectively. Also, it was possible to verify a linear behavior of the detector response with the variation of the current in the X-ray tube.

Keywords: TH-GEM Detector, Radiation Metrology, Standard Mammography Beams.

Lista de Figuras

- 3.1 Regiões de predominância relativa das três principais formas de interação de fótons com a matéria. A curva à esquerda representa a situação em que a probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétrico e Compton são iguais; a curva à direita, para o efeito Compton e produção de pares. Reprodução de [YOSHIMURA, 2009]. 30
- 3.2 Dependência entre tensão e corrente resultante no argônio em pressão atmosférica e temperatura de 20°C. O patamar observado refere-se à região de saturação. A partir de 3000 V é possível observar a curva exponencial causada pelo efeito avalanche (região proporcional). Reprodução de [SAULI, 2014]. 41
- 3.3 Configuração do campo elétrico no detector do tipo MSGC nas proximidades das tiras condutoras. A região de multiplicação está localizada próximo ao anodo. Adaptação de [SAULI, 2014]. 43
- 3.4 Configuração do campo elétrico no detector do tipo MICROMEGAS nas proximidades da micro-malha. Adaptação de [SAULI, 2014]. 44
- 3.5 Imagem realizada por um microscópio eletrônico de um eletrodo do tipo GEM típico, com 50 μm de espessura. O passo e o diâmetro dos furos são 140 μm e 70 μm , respectivamente. Reprodução de [SAULI, 2016]. . . 45
- 3.6 Configuração do campo elétrico no detector do tipo GEM dentro dos orifícios e nas proximidades. Adaptação de [SAULI, 2014]. 46

3.7	Exemplos de eletrodos do tipo GEM não retangulares. (a) Um eletrodo GEM semicircular, com 30 cm de diâmetro; (b) um conjunto de eletrodos GEM cilíndricos. Reprodução de [SAULI, 2016].	47
3.8	Regiões adjacentes ao plano do TH-GEM, em operação. A placa de amplificação está indicada como GEM. Adaptação de [BALAU, 2007]. . .	48
3.9	Ilustração esquemática de um detector do tipo GEM. Adaptação de [CORTESI et al., 2007].	49
3.10	Exemplo de arranjo experimental de detectores do tipo GEM associados a dispositivos CCD. Neste caso, é apresentado um GEM de folha dupla associado a um dispositivo CCD para dosimetria 2D em feixes de prótons para radioterapia. Adaptação de [TIMMER et al., 2002].	52
3.11	(a) Esquema simplificado de um detector do tipo TH-GEM em uma câmara cavitária para dosimetria 2D de feixes mistos de nêutrons e radiação gama (b) Imagem da base de alumínio com as camadas do detector TH-GEM construídas. Adaptação de [DARVISH-MOLLA et al., 2018]	53
3.12	Corrente medida pelo picoamperímetro do detector do tipo GEM (pontos em vermelho) versus a taxa de dose de raios X de 6 MeV determinada com uma câmara de ionização calibrada (linha verde). Reprodução de [FUJIWARA et al., 2013].	54
3.13	Distribuição de contagens para um feixe de prótons de 133 MeV obtido com um detector do tipo GEM de 5 cm x 5 cm para monitoramento. Reprodução de [AZA et al., 2017].	54
3.14	Exemplo da utilização de detectores do tipo GEM para produção de imagens com raios X. (a) Imagem óptica da flor utilizada para demonstração; (b) imagem de transmissão de raios X obtida utilizando um detector do tipo GEM. Reprodução de [FUJIWARA et al., 2017].	56

3.15	Exemplo de tomografia computadorizada tridimensional de alta resolução realizada com um detector do tipo GEM. (a) Fotografia do comprimido a ser imageado; (b) imagem 3D reconstruída e em cada eixo do comprimido utilizando um detector do tipo GEM. Reprodução de [FUJIWARA et al., 2017].	57
4.1	Espectro da qualidade padronizada de mamografia WMV28 no LCI/IPEN. Reprodução de [SILVA, 2016].	59
5.1	Universo da simulação visualizada com o <i>software Vised X22S</i> . As linhas verdes representam a trajetória dos fótons do feixe de radiação. Os pontos vermelhos representam os fótons primários e secundários.	66
5.2	Seção transversal do detector TH-GEM modelado pelo código MCNP5, visualizado com o <i>software Vised X22S</i> . A cor vermelha representa o ar seco; Verde: blindagem de alumínio; Azul: gás argônio que preenche o detector; Amarelo: invólucros e separadores de polioximetileno; Cinza: placa de amplificação e coleta de fibra de vidro.	67
5.3	Vista tridimensional do detector TH-GEM modelado pelo código MCNP5 e visualizado com o <i>software Vised X22S</i>	67
5.4	Universo da simulação com uma parede de concreto localizada atrás do detector do tipo TH-GEM. As linhas verdes representam a trajetória dos fótons do feixe de radiação. Os pontos vermelhos representam os fótons primários e secundários.	69
5.5	Célula unitária da geometria modelada no Gmsh para as simulações no <i>software Garfield++</i>	70
5.6	Célula unitária modelada no Gmsh com uma vista 3D da malha de elementos finitos. Para melhor visualização, a malha na região do gás não está visível.	70

5.7	Distribuição do campo elétrico em V/cm dentro de um orifício da placa de amplificação, obtido pelo <i>software</i> Elmer. Foi utilizada a diferença de potencial de 1000 V entre as camadas de cobre da placa de amplificação.	71
5.8	Magnitude do campo elétrico por uma linha transversal imaginária que passa pelo centro de um orifício. Foi utilizada a diferença de potencial de 1000 V entre as camadas de cobre da placa de amplificação.	72
5.9	Valores máximos de campo elétrico obtido para cada tensão aplicada à placa de amplificação. Coeficiente de correlação linear $R^2 = 1,000$	72
5.10	Avalanche de elétrons em um detector TH-GEM simulado com Garfield++. O eletrodo coletor não é visível na figura.	73
5.11	Ganho absoluto obtido por simulação em função da tensão aplicada à placa de amplificação para diferentes misturas de gases. A incerteza máxima foi de 6,8% para a mistura de Ar/CO ₂ na concentração 90/10. .	74
5.12	Resultados obtidos por simulação para as eficiências de coleção. O campo elétrico é referente ao campo elétrico na região de deriva. A diferença de potencial na placa de amplificação foi mantida em 100 V e o campo elétrico na zona de indução em 100 V/cm.	76
5.13	Resultados obtidos por simulação para as eficiências de extração. O campo elétrico é referente ao campo elétrico na região de indução. A diferença de potencial na placa de amplificação foi mantida em 100 V e o campo elétrico na zona de deriva em 200 V/cm.	77
5.14	Fluxo de gás dentro do detector obtido pelo <i>software</i> Elmer. As linhas representam o fluxo de gás e as cores representam as magnitudes de velocidades. (a) Vista frontal do detector; (b) Vista lateral do detector. .	78
6.1	Visão explodida do detector do tipo TH-GEM construído para visualização de cada componente.	79

6.2	Construção do invólucro do detector na oficina de usinagem do Laboratório de Análise de Materiais com Feixes Iônicos da Universidade de São Paulo.	81
6.3	Os suportes para a placa de amplificação foram construídos do mesmo material e acoplados ao invólucro.	81
6.4	Foto dos componentes do detector TH-GEM sem a blindagem. As conexões de gás e os fios para as ligações elétricas são visíveis na figura. A placa de amplificação consiste em uma placa de circuito impresso perfurada em um padrão hexagonal, com orifícios de $(0,254 \pm 0,021)$ mm de diâmetro e $(1,11 \pm 0,12)$ mm de distância entre eles.	82
6.5	Foto da malha de furos da placa de amplificação escaneada com resolução de 1200 dpi. Os círculos em vermelho são os orifícios detectados e medidos pelo código em Python.	83
6.6	Conjunto das duas placas de alumínio que compõem a blindagem do detector e o posicionamento da janela de entrada.	84
7.1	Banho ultrassônico com álcool isopropílico na placa de amplificação.	85
7.2	Centelha em um único orifício com 100 V de tensão aplicada entre os revestimentos de cobre da placa de amplificação.	87
7.3	Foto da placa de amplificação ampliada, onde é possível observar: (a) uma farpa encontrada em um dos orifícios; (b) uma farpa encontrada em um orifício após observada uma centelha.	87
7.4	Corrente medida em função da tensão aplicada à placa de amplificação. A incerteza máxima foi de $\pm 2\%$ e não é visível no gráfico.	88
7.5	Arranjo experimental para os testes com o detector do tipo TH-GEM no LAMFI-USP. O computador está ligado à mini fonte de raios X, onde é possível mudar a tensão e a corrente aplicada ao tubo. O cilindro de gás não é visível na foto.	89

7.6	Arranjo experimental para determinação da corrente primária. Para V_1 foi utilizada a tensão de 800 V.	90
7.7	Corrente primária coletada no detector para diferentes correntes no tubo de raios X. Obteve-se um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0,98773.	90
7.8	Arranjo experimental para obtenção da corrente gerada na placa coletora.	91
7.9	Corrente coletada no eletrodo coletor do detector para diferentes valores de corrente no tubo de raios X. Obteve-se um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0,9980.	92
7.10	Determinação do ganho efetivo para uma diferença de potencial de 200 V à placa de amplificação. (a) Comparação do ajuste linear dos dados obtidos para corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho). (b) O fator 1,5 foi o que apresentou menor diferença quadrática neste caso.	93
7.11	Corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho), quando aplicada uma diferença de potencial de 300 V à placa de amplificação.	93
7.12	Corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho), quando aplicada uma diferença de potencial de 400 V à placa de amplificação.	94
7.13	Corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho), quando aplicada uma diferença de potencial de 450 V à placa de amplificação.	94
7.14	Ganho efetivo obtido em função da diferença de potencial aplicada à placa de amplificação.	95

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros da qualidade de radiação padronizada de mamografia (WMV28) estabelecida no sistema de radiação do LCI [CORRÊA et al., 2012]. . . .	59
5.1	Dimensões do detector	65
5.2	Valores de influência obtidos para cada componente.	68
5.3	Valores de influência obtidos para cada janela de entrada.	68

Lista de Abreviaturas

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CCD	Charge Coupled Device
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CNC	Computer Numeric Control
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
GEM	Gas Electron Multiplier
HEPIC	High Energy Physics Instrumentation Center
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IFUSP	Instituto de Física da Universidade de São Paulo
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
kerma	Kinect Energy Released per unit MAss
LAMFI	Laboratório de Análises de Materiais com Feixes Iônicos
LANL	Los Alamos National Laboratory
LCI	Laboratório de Calibração de Instrumentos
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MICROMEGAS	MICROMEsh GASEous Chamber

MPGD	MicroPattern Gaseous Detector
MSGC	Micro-Strip Gas Detector
MSV	Mean Square Voltage
MWPC	MultiWire Proportional Chamber
NIST	National Institute of Standards and Technology
SSDL	Secondary Standard Dosimetry Laboratories
TEPC	Tissue Equivalent Proportional Counter
TH-GEM	THick Gas Electron Multiplier
USP	Universidade de São Paulo
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
INMETRO	Instituto Nacional de METROlogia, qualidade e tecnologia
ISO	International Organization for Standardization

Sumário

1	Introdução	21
2	Objetivos	26
3	Fundamentos Teóricos	27
3.1	Interação dos Fótons com a Matéria	27
3.1.1	Absorção Fotoelétrica	27
3.1.2	Espalhamento Compton	28
3.1.3	Produção de Pares	28
3.1.4	Efeito Rayleigh	28
3.1.5	Predominância Relativa de Efeitos	29
3.1.6	Atenuação da Radiação pela Matéria	30
3.1.7	Produção de Raios X	31
3.2	Principais Grandezas Dosimétricas	32
3.2.1	Exposição	33
3.2.2	Kerma	34
3.2.3	Dose Absorvida	35
3.3	Detectores a Gás	35
3.3.1	Princípios de Funcionamento	36
3.3.2	Eficiência de Detecção	38
3.3.3	Número de Pares de Elétrons e Íons Produzidos no Gás	38
3.3.4	Velocidade de Deriva	39
3.3.5	Relação entre Tensão e Carga Coletada	40

3.3.6	Efeito Avalanche	40
3.4	Detecutores Gasosos Microestruturados	42
3.4.1	<i>Micro-Strip Gas Counter</i>	43
3.4.2	<i>Micromesh Gaseous Structure</i>	43
3.4.3	<i>Gas Electron Multiplier</i>	45
3.5	Detecutores do tipo TH-GEM	48
3.6	Aplicações Dosimétricas e Produção de Imagens	51
4	Materiais e Métodos	58
4.1	Sistema de Radiação	58
4.2	Sistemas de Medição e Instrumentos Auxiliares	60
4.3	Ferramentas Computacionais	60
4.4	Avaliação de Incertezas	62
5	Resultados: Desenvolvimento do Detector do tipo TH-GEM	64
5.1	Determinação da Geometria e dos Materiais	64
5.2	Caracterização em Termos de Ganho Absoluto	69
5.3	Caracterização em Termos de Eficiências	74
5.4	Fluxo de Gás	77
6	Resultados: Construção do Detector do Tipo TH-GEM	79
6.1	Invólucro e Suportes	80
6.2	Placas de Amplificação e Coletora	81
6.3	Blindagem e Janela de Entrada	83
7	Resultados: Caracterização Experimental	85
7.1	Caracterização Elétrica	86
7.2	Caracterização em Termos de Ganho Efetivo	89
8	Conclusões	96

Sugestão para Trabalhos Futuros	98
Referências Bibliográficas	100
A Desenho técnico do Detector do tipo TH-GEM desenvolvido	106

Capítulo 1

Introdução

O uso de radiação ionizante na medicina, seja para aplicações em terapia ou para diagnóstico de doenças, cresceu muito ao longo dos anos. Desta forma, houve um desenvolvimento acentuado de equipamentos para esses fins, a exemplo dos aceleradores lineares para uso em radioterapia, dos tomógrafos de alta resolução e dos mamógrafos digitais. Todavia, as aplicações das radiações ionizantes não se restringem somente à área médica. Entre os diversos processos industriais que utilizam a radiação ionizante, é possível citar a esterilização de materiais cirúrgicos, a coloração artificial de gemas para joias e semijoias, o controle de espessura de filmes, os medidores de nível de líquidos em envasamentos, a inspeção de tubulações por meio da gamagrafia, a conservação de alimentos, entre outros exemplos [OKUNO e YOSHIMURA, 2010].

Em geral, o uso das radiações ionizantes requer a utilização de detectores de radiação, ou seja, equipamentos que tenham sensibilidade para detectar a presença da radiação ou mesmo para quantificá-la. Os detectores de radiação podem variar radicalmente de conceito, forma e tamanho. Entretanto, para todos os tipos de detectores há algumas características importantes que devem ser conhecidas, para que suas respostas sejam adequadamente interpretadas e empregadas corretamente. Essas características são: eficiência, exatidão, sensibilidade, repetibilidade, reprodutibilidade, faixa dinâmica, tempo de resposta, linearidade da resposta e resolução espacial (para detectores sensíveis à posição) e resolução energética (para detectores espectroscópios). Outros fatores determinantes na escolha do detector incluem a facilidade de operação, a disponibilidade

de manutenção e, finalmente, o custo do detector [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

Diversos detectores de radiação atuam como dosímetros, tanto no monitoramento de feixes de radiação, e no controle de qualidade de equipamentos, como na dosimetria de indivíduos e de ambientes. Um dosímetro pode ser definido como qualquer dispositivo capaz de fornecer uma leitura relacionada à dose absorvida que foi depositada por uma radiação ionizante em seu volume sensível [ATTIX, 2004]. Além das propriedades gerais de um detector de radiação, um dosímetro deve possuir um fator de calibração bem estabelecido e com rastreabilidade metrológica, além de apresentar incertezas adequadas, para sua aplicação.

As especificações dos dosímetros para uso em feixes clínicos e para radioproteção são bem restritas e norteadas por normas nacionais e internacionais. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabelece que a calibração de equipamentos utilizados na monitoração e na calibração de feixes e fontes empregadas em exposição médica seja rastreada por um laboratório padrão de dosimetria, reconhecido ou autorizado pela CNEN [2014].

O Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI-IPEN) realiza serviços de calibração de instrumentos aplicados em procedimentos de radioterapia, radioproteção, medicina nuclear e radiodiagnóstico, seguindo recomendações internacionais para cada área de aplicação de serviço de calibração e dosimetria [IAEA, 2000; IAEA, 2001; IAEA, 2007; ISO, 2019; ANVISA, 2019] . Possui sistemas de referência de medição com rastreabilidade aos Laboratórios de Padronização Primários Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB (Alemanha), National Physical Laboratory – NPL (Inglaterra) e Bureau International des Poids et Mesures – BIPM (França), e participa regularmente das comparações interlaboratoriais organizadas pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes - LNMRI (Rio de Janeiro). O LNMRI faz parte da rede SSDL (Secondary Standard Dosimetry Laboratories), rede de laboratórios secundários da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), e é o laboratório designado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e

Tecnologia) como Laboratório Nacional do Brasil para fins de rastreabilidade de padrões de radiação ionizante.

O grupo de pesquisa do LCI-IPEN vem desenvolvendo pesquisas relacionadas a métodos de dosimetria das radiações e de calibração de instrumentos, assim como de detectores de radiação e sistemas de referência, envolvendo radiações X, alfa, beta e gama, priorizando o uso de materiais que podem ser produzidos ou adquiridos no mercado nacional.

O campo de detectores no conceito *MicroPattern Gaseous Detector* - MPGD (detectores gasosos microestruturados) representa atualmente um setor de tecnologias em crescimento dinâmico, entre as quais os detectores do tipo GEM (*Gas Electron Multiplier*) são candidatos promissores para uso futuro em larga escala e aplicações generalizadas [TESSAROTO, 2018].

O detector do tipo GEM é um detector a gás baseado na multiplicação de elétrons pelo efeito avalanche. Foi proposto pela primeira vez no CERN (European Organization for Nuclear Research) como um detector sensível à posição, para a determinação de trajetórias de partículas provenientes de colisões de altas energias. Consiste em uma fina folha de polímero (espessura típica de 50 μm), revestida em ambos os lados por uma fina camada metálica (espessura típica de 3 μm), e perfurada em padrão hexagonal com furos micrométricos (diâmetro típico do furo de 50 μm). É então aplicada uma diferença de potencial entre as duas camadas metálicas, criando um campo elétrico intenso dentro de cada orifício. Por esta folha ser imersa em um gás apropriado, cada orifício atua então como um contador proporcional independente, multiplicando os elétrons liberados por radiação ionizante no gás pelo efeito avalanche [SAULI, 1977].

O detector Thick-GEM (TH-GEM) é uma variação do detector GEM. Sua estrutura assemelha-se à de uma escala ampliada, com dimensões dez vezes maiores do que o GEM. Detectores do tipo TH-GEM são frequentemente fabricados com placa de circuito impresso e são considerados multiplicadores robustos que apresentam ganhos altos e sinais rápidos na ordem de nanosegundos [CHECHIK et al., 2004]. As vantagens dos

detectores TH-GEM em relação ao GEM são: simplicidade de construção, baixo custo e robustez [BRESKIN et al., 2009].

Variações dos detectores do tipo GEM ou TH-GEM têm sido utilizados para microdosimetria bidimensional sensível à posição para medir dose equivalente de nêutrons [MOSLEHI & RAISALI, 2017], feixes mistos de nêutrons e de radiação gama [DARVISH-MOLLA et al., 2018], feixes de raios X produzidos por elétrons monoenergéticos de 6 MeV direcionados a um alvo de tungstênio [FUJIWARA et al., 2013], feixes de prótons entre 130 MeV e 190 MeV [TIMMER et al., 2002; SERAVALLI et al., 2009] e feixes de partículas alfa de 360 MeV [SERAVALLI et al., 2007]. Além disso, há estudos para caracterização e calibração de detectores do tipo Triplo-GEM para seu uso em dosimetria médica. Neste caso, foram utilizadas fontes radioativas (Fe-55, Sr-90, Tl-204 e Am-241) e um sistema portátil de raios X (tensão no tubo de 40 kV a 125 kV e corrente do tubo de 0,1 mA a 100 mA) [MOROS & SERRATO, 2021].

Outra das potencialidades do uso de GEMs está na produção de imagem com raios X [CORTESI et al., 2007; HANU, 2013; SOUZA, 2019] e tomografia computadorizada tridimensional de alta resolução [FUJIWARA et al., 2017]. O uso de detectores desse tipo para realização de imagens de grandes áreas com feixes de raios X de baixas energias (<10 keV) tem se mostrado especialmente útil, pois nele o processo de avalanche é capaz de amplificar pequenos sinais com ganhos de até 10^4 , diminuindo o tempo de integração necessário para gerar uma imagem de qualidade, comparados aos detectores de estado sólido [FUJIWARA et al., 2018].

Com o objetivo de contribuir nessa linha de pesquisa, este trabalho visa oferecer evidências de que é possível utilizar o sinal elétrico produzido por um detector do tipo Thick-GEM para fins dosimétricos. Com isso, uma possível consequência deste trabalho seria a prova de viabilidade da obtenção de imagens radiográficas, ou tomográficas, utilizando detectores do tipo Thick-GEM, cuja informação de contraste represente quantitativamente níveis de dose absorvida pelo corpo imageado. Um dosímetro com as qualidades do detector TH-GEM (robusto, sensível à posição, com alta sensibilidade, ga-

nhos altos e sinais rápidos) é bastante desejado em muitas aplicações como, por exemplo, em medicina diagnóstica e terapêutica, radiografia industrial e medidores nucleares.

Para cumprir esse objetivo, foi proposto neste trabalho o estudo da viabilidade de utilização dos detectores do tipo TH-GEM em aplicações dosimétricas para raios X entre 28 kV a 35 kV (feixes de radiação padronizados de mamografia). Este estudo foi pautado em simulações computacionais para otimização das condições de detecção, e no projeto, construção e caracterização de um protótipo com características adequadas para o uso dosimétrico.

A proposta de realização deste trabalho dá-se no âmbito de uma colaboração institucional entre o LCI-IPEN, o Laboratório de Análises de Materiais com Feixes Iônicos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (LAMFI-USP) e o High Energy Physics Instrumentation Center do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (HEPIC-USP).

Capítulo 2

Objetivos

Neste projeto, é proposto o estudo da viabilidade de utilização dos detectores do tipo TH-GEM em aplicações dosimétricas para raios X com tensão máxima entre 28 kV e 35 kV (feixes de radiação padronizados de mamografia). A fim de alcançar a meta principal deste trabalho, foram propostos os objetivos específicos:

1. Estudo, pelo método de simulação de Monte Carlo, das dimensões e dos materiais de um detector do tipo TH-GEM com características adequadas para metrologia de feixes padronizados de mamografia;
2. Estudo, por simulação, do transporte de carga no meio gasoso para o detector do tipo TH-GEM;
3. Produção de um protótipo de um detector do tipo TH-GEM, com as características determinadas;
4. Realização de testes para a caracterização do protótipo construído.

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

3.1 Interação dos Fótons com a Matéria

Radiação ionizante é qualquer radiação, com ou sem massa de repouso, que pode remover elétrons de átomos e moléculas. O conjunto das radiações ionizantes comumente estudadas são: partículas carregadas, nêutrons e radiação eletromagnética.

A radiação eletromagnética, que é o foco deste trabalho, pode ser definida como a combinação de campos elétricos e magnéticos variáveis que se propagam no espaço. Devido a seu comportamento ondular, pode ser classificada tanto em termos de comprimento de onda como de frequência. Por possuir energia quantizada, pode ser interpretada também como sendo composta por partículas (pacotes de energia) denominadas fótons. Dessa forma, quando a onda eletromagnética é emitida, absorvida ou espalhada, tanto a energia quanto o momento que ela carrega consigo são compartilhados com as partículas responsáveis pelo processo.

Os fótons podem interagir com a matéria através de diversos processos que serão apresentados resumidamente a seguir.

3.1.1 Absorção Fotoelétrica

No processo de absorção por efeito fotoelétrico, o fóton tem sua energia integralmente absorvida por um átomo do meio. A interação do fóton com o elétron orbital de camadas mais internas resulta na ejeção de um fotoelétron rápido com energia cinética

igual à energia do fóton menos a energia de ligação do elétron (função trabalho).

Esse fenômeno só é possível quando a energia do fóton for superior à energia de ligação do elétron.

3.1.2 Espalhamento Compton

No espalhamento Compton o fóton interage com um elétron orbital fracamente ligado ao átomo e é espalhado, de modo que somente uma parte da energia do fóton é transferida na forma de energia cinética para o elétron e o fóton espalhado pode continuar interagindo com a matéria. A energia do fóton espalhado é a diferença entre a energia do fóton incidente e a energia cinética do elétron.

3.1.3 Produção de Pares

Produção de pares é o processo que resulta na conversão de um fóton em um par elétron-pósitron. No caso de um fóton, com energia mínima de 1,022 MeV, interagindo com o campo elétrico do núcleo, o excesso de energia é distribuído na forma de energia cinética entre as duas partículas recém-formadas (elétron e pósitron). A aniquilação do pósitron com um elétron do meio faz com que dois fótons de 0,511 MeV sejam emitidos em sentidos opostos.

3.1.4 Efeito Rayleigh

O efeito Rayleigh, também conhecido como espalhamento Thomson ou espalhamento coerente, corresponde à absorção e reemissão de um fóton pelo átomo, em uma direção diferente de sua incidência. O átomo, como um todo, recebe o momento transferido, mas sua energia de recuo é muito pequena e o fóton é espalhado com a mesma energia inicial. Neste processo, os ângulos de espalhamento são normalmente pequenos.

Este efeito ocorre quando o raio da partícula alvo é muito menor do que o comprimento de onda dos fótons dispersados.

3.1.5 Predominância Relativa de Efeitos

A predominância relativa dos efeitos depende da energia do fóton e do número atômico Z do meio absorvedor. Esta probabilidade de interação é, normalmente, expressa pela secção de choque.

Sob o ponto de vista da probabilidade de ocorrência, os efeitos Rayleigh e fotoelétrico ocorrem com maior probabilidade para baixas energias e em absorvedores de alto número atômico, enquanto o espalhamento Compton ocorre para energias intermediárias. A produção de pares acontece acima de um limiar de energia, sendo necessário que o fóton tenha no mínimo 1,022 MeV de energia (equivalente a duas massas de repouso de elétron) para que toda sua energia se converta em massa de repouso e energia cinética do par elétron-pósitron [YOSHIMURA, 2009].

Em termos de detecção da radiação, pode-se dizer que os principais efeitos são: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares [KNOLL, 2010]. O efeito Rayleigh, por sua vez, pode contribuir levemente para deteriorar a resolução espacial em qualquer detector de imagem.

A Figura 3.1 mostra as regiões de predominância relativa das três principais formas de interação de fótons com a matéria em relação à energia do fóton e ao número atômico do absorvedor.

Figura 3.1: Regiões de predominância relativa das três principais formas de interação de fótons com a matéria. A curva à esquerda representa a situação em que a probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétrico e Compton são iguais; a curva à direita, para o efeito Compton e produção de pares. Reprodução de [YOSHIMURA, 2009].

3.1.6 Atenuação da Radiação pela Matéria

A radiação eletromagnética é muito mais penetrante na matéria do que as partículas carregadas. Isso ocorre, porque o feixe de fótons não é degradado em energia, somente atenuado em intensidade.

Cada um dos processos de interação remove fótons dos feixes de radiação, por absorção ou dispersão com ângulos significativos. Essa atenuação pode ser caracterizada por uma probabilidade fixa de ocorrência por unidade de comprimento no absorvedor. A atenuação sofrida por um feixe de fótons segue um decaimento exponencial com respeito à espessura do absorvedor, como mostra a Equação 3.1 [KNOLL, 2010]:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (3.1)$$

onde I_0 é a intensidade do feixe incidente, x é a espessura do absorvedor e μ é o coeficiente de absorção linear (em cm^{-1}), grandeza diretamente relacionada com a

secção de choque de interação (σ), dada pela Equação 3.2:

$$\mu = N\sigma = \sigma(N_a\rho/A) \quad (3.2)$$

onde N é a densidade de átomos, N_a é o número de Avogadro, ρ é a densidade do material e A é o peso molecular.

O uso do coeficiente de atenuação linear é limitado pelo fato de variar com a densidade do absorvedor, mesmo que o material seja o mesmo. Portanto, o coeficiente de atenuação mássico é amplamente usado e é definido pela Equação 3.3 [KNOLL, 2010]:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.3)$$

onde μ_m é o coeficiente de atenuação mássico (em cm^2/g) e ρ é a densidade do material (em g/cm^3).

3.1.7 Produção de Raios X

Radiações X e gama são exemplos de radiação eletromagnética. Apresentam as mesmas propriedades, mas possuem origens diferentes. Enquanto a radiação gama é oriunda da desexcitação nuclear, os raios X são produzidos na eletrosfera ou pela interação de um elétron com o núcleo atômico.

O tubo de raios X é constituído por uma ampola de vidro a vácuo, contendo dois eletrodos (eletrodo negativo denominado catodo e um eletrodo positivo denominado anodo). Os elétrons são produzidos em um filamento aquecido (catodo), por meio de emissão termoiônica e acelerados por uma alta diferença de potencial em direção a um alvo metálico (anodo). A interação dos elétrons acelerados com o campo coulombiano do núcleo do átomo no anodo faz com que ocorra uma súbita desaceleração do elétron, que implica na perda de energia em forma de calor e em radiação X [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

Quanto maior a tensão aplicada ao tubo, maior será a energia dos raios X gerados

e maior também será seu poder de penetração, e aumentando-se a corrente, aumenta-se a intensidade do feixe.

Quando os elétrons do feixe ou fótons produzidos no alvo removem elétrons das camadas mais internas dos átomos do alvo, pode ocorrer ionização. Estes átomos ionizados voltam ao seu estado de equilíbrio preenchendo a lacuna criada com a transição de elétrons de um nível de energia mais alto para um de nível de energia mais baixo. Nesse processo ocorre a emissão de raios X característicos, que, diferente dos raios X de freamento (*Bremsstrahlung*), possuem espectros de energia discretos e característicos de cada átomo, funcionando como uma “assinatura” do material [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

No processo de produção de raios X, o espectro emitido terá linhas bem definidas características do material que compõem o alvo metálico do tubo de raios X, sobrepostas a um fundo contínuo de *Bremsstrahlung* gerado pela desaceleração dos elétrons.

3.2 Principais Grandezas Dosimétricas

Uma questão importante na utilização das radiações ionizantes é como realizar uma medição das grandezas utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria.

Após 30 anos da descoberta dos raios X, sentiu-se a necessidade de criar uma comissão para tratar de questões referentes ao desenvolvimento de equipamentos e protocolos de medição, além de cuidados a serem tomados com as radiações ionizantes. A *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) foi a primeira comissão internacional criada com o objetivo de estabelecer grandezas e unidades da Física das Radiações. Três anos depois foi criada uma segunda comissão internacional, a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), para estabelecer normas de proteção radiológica e limites de exposição às radiações ionizantes [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

As grandezas dosimétricas fornecem a medida física para correlacionar os efeitos

reais ou potenciais da radiação. A ICRU define as grandezas dosimétricas como sendo o produto das grandezas radiométricas (associadas ao campo de radiação) e os coeficientes de interação (associados aos processos de interação da radiação com a matéria), sendo as grandezas dosimétricas fundamentais: exposição, kerma e dose absorvida [ICRU, 2011].

Nas áreas de radioproteção (para radiação de fótons) e radiodiagnóstico, a grandeza na qual os padrões nacionais são calibrados é o kerma no ar. A partir do kerma no ar pode-se determinar todas as grandezas de uso prático. Para o controle de qualidade na área de radiodiagnóstico, a grandeza kerma no ar é suficiente tanto na caracterização e controle da fonte, quanto para avaliação do desempenho do sistema de captação e registro da imagem. A dosimetria do paciente é um pouco mais complexa, uma vez que algumas grandezas de interesse não podem ser obtidas diretamente [RAMOS et al., 2011].

Na radioterapia as grandezas de calibração são divididas de acordo com o tipo de tratamento, sendo as mais utilizadas o kerma no ar e a dose absorvida na água [RAMOS et al., 2011].

3.2.1 Exposição

A grandeza exposição, simbolizada por χ , é definida pela capacidade de fótons (radiação eletromagnética) ionizarem o ar seco, sendo determinada pela razão entre a quantidade de carga elétrica de mesmo sinal produzida no ar, dQ , e a unidade de massa do ar, dm , dada pela Equação 3.4 [ICRU, 2011].

$$\chi = \frac{dQ}{dm} \quad (3.4)$$

Essa carga elétrica é resultante de ionizações por partículas carregadas, como o elétron emitido nos efeitos fotoelétrico, Compton e na produção de pares (neste último caso emitindo também um pósitron).

Devido à necessidade de se conhecer perfeitamente a massa do volume de ar seco e de coletar toda a carga de mesmo sinal num eletrodo, a medição da exposição só é

factível utilizando a câmara de ionização de ar livre. Dessa forma, esta grandeza só pode ser definida para radiação X ou gama, uma vez que as radiações alfa não conseguem penetrar na câmara para ionizar o ar livre, e as radiações beta não permitem condições de homogeneidade ou equilíbrio eletrônico na coleta dos elétrons [TAUHATA et al., 2014].

Apesar da grandeza exposição ter sido muito utilizada e difundida na radioproteção, sua unidade, Roentgen, foi abandonada em 1985 por recomendação da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM). Nesta mesma ocasião o CGPM sancionou que as unidades do domínio das radiações ionizantes fossem dimensionadas em unidades do Sistema Internacional (SI) [RAMOS et al., 2011].

3.2.2 Kerma

A grandeza kerma é a sigla para *Kinetic Energy Released per Unit Mass* (energia cinética liberada por unidade de massa). Esta grandeza pode ser utilizada para qualquer tipo de radiação ionizante que não seja diretamente ionizante e em todos os meios, além de ser independente da complexidade do transporte da energia pelas partículas carregadas secundárias.

É definida pela Equação 3.5 [ICRU, 2011]:

$$K = \frac{dE_{tr}}{d_m} \quad (3.5)$$

onde dE_{tr} é a soma média das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas em uma massa (d_m) de um material pelas partículas não carregadas incidentes em (d_m).

A quantidade dE_{tr} inclui a energia cinética das partículas carregadas emitidas no decaimento de átomos/moléculas excitados ou no desexcitamento ou desintegração nuclear.

A taxa de kerma ($\dot{K}$) é o quociente do incremento de kerma (dK) no tempo dt , assim:

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (3.6)$$

A unidade de medição do kerma (K) no Sistema Internacional é Joule/quilograma (J/kg), e sua unidade especial é o Gray (Gy) [1J/kg = 1Gy].

A grandeza kerma no ar (K_{ar}) pode ser expressa pela Equação 3.7 [ICRU, 2011]:

$$K_{ar} = \frac{\overline{W}/e}{(1 - g)} \chi \quad (3.7)$$

onde $\overline{W}$ é a energia média necessária para a formação de um par de íons no ar, e é a carga do elétron, $(1 - g)$ é a correção média para perdas de energia dos elétrons secundários por radiação de freamento e χ é a capacidade dos fótons ionizarem o ar (exposição).

3.2.3 Dose Absorvida

A grandeza dose absorvida (D) é definida para qualquer tipo de radiação e geometria de irradiação e é determinada pela Equação 3.8 [ICRU, 2011]:

$$D = \frac{dE_{ab}}{d_m} \quad (3.8)$$

onde dE_{ab} é a energia média depositada pela radiação em um meio de massa d_m .

A unidade de medição no Sistema Internacional da grandeza dose absorvida, assim como a grandeza kerma, é dada por Joule/quilograma (J/kg), e sua unidade especial é o Gray (Gy) [1J/kg = 1Gy].

3.3 Detectores a Gás

A detecção da radiação dá-se de forma indireta, através da interação da radiação com o material que compõe o detector. Os detectores são basicamente constituídos de um elemento ou material sensível à radiação e de um sistema que transforma os efeitos causados nesse material em um valor mensurável, o qual está relacionado com

uma grandeza física do sistema de medição. Esses efeitos são causados por diversos processos físicos e variam de um detector para outro [KNOLL, 2010].

Os detectores a gás são dispositivos versáteis que podem operar a altas taxas de contagens e ser empregados em medições de energia de todos os tipos de partículas carregadas, ou para detecção de radiação eletromagnética. Além disso, há possibilidade de se encaixarem em várias condições experimentais e sua construção apresenta custos relativamente baixos. Algumas das suas desvantagens podem estar ligadas à degradação dos gases que preenchem o detector devido à irradiação, o que implica a necessidade de ser constantemente renovado ou purificado, e problemas com vazamentos.

A câmara de ionização, o contator proporcional e o detector Geiger-Müller fazem parte do grupo de detectores a gás. Esses três tipos de detectores são utilizados para diferentes situações, mas funcionam basicamente do mesmo modo: a radiação ioniza alguns átomos ou moléculas do gás e os elétrons gerados são coletados por um eletrodo. A proporção entre o número de átomos ionizados e o sinal obtido depende da intensidade do campo elétrico e do tipo de gás [KNOLL, 2010].

A seguir são apresentados os conceitos básicos do funcionamento de detectores a gás em geral.

3.3.1 Princípios de Funcionamento

Os detectores a gás são geralmente constituídos por câmaras preenchidas com algum tipo de gás, ou uma mistura de gases, e dois eletrodos, aos quais são aplicados uma diferença de potencial configurando um campo elétrico. O feixe de radiação ioniza as moléculas do gás ao atravessá-lo e as cargas formadas são então coletadas por meio dos eletrodos devido à diferença de potencial aplicada entre eles. O número de pares elétrons e sua distribuição dependem da natureza e da energia da radiação [SAULI, 2014].

Há três modos de operação de um detector: modo pulso, modo corrente e o modo média quadrática da tensão (*mean square voltage*, MSV). Os detectores que fornecem informação sobre a energia da radiação (espectroscopia) devem ser operados

no modo pulso. Neste caso, a integral de cada pulso com relação ao tempo (carga total) é registrada, de forma que a quantidade de ionização produzida pela radiação é proporcional à energia depositada no volume sensível. Em uma abordagem mais simples, quando apenas a intensidade da radiação é de interesse, todos os pulsos acima de um limiar são registrados, independentemente do valor da carga total. Esta abordagem é frequentemente chamada de contagem de pulsos e pode ser útil em muitas aplicações nas quais não é necessário detectar quaisquer alterações ou informações sobre a distribuição da energia incidente da radiação. É importante destacar que para taxas altas de eventos o modo pulso torna-se impraticável, pois o tempo entre eventos pode ser muito curto para realizar uma análise adequada, ou os pulsos de corrente de eventos sucessivos podem se sobrepor no tempo [KNOLL, 2010].

O modo corrente é utilizado quando se deseja medir a taxa média de eventos. Supondo que o detector tem um tempo de resposta fixo, o sinal registrado de uma sequência de eventos será uma corrente dependente do tempo. Como esse tempo é tipicamente mais longo em comparação com o tempo médio entre os pulsos de correntes, o efeito é a média das flutuações entre os pulsos. Dessa forma, a escolha de um tempo de medição maior minimizará as flutuações estatísticas no sinal, mas também diminuirá a resposta às mudanças rápidas na taxa ou na natureza das interações da radiação. A corrente média (I) é dada pela Equação 3.9 [KNOLL, 2010]:

$$I = rQ = r \frac{E}{\overline{W}} q \quad (3.9)$$

onde r é a taxa de evento, Q é a carga produzida por cada evento, E é a energia média depositada por evento, $\overline{W}$ é a energia média necessária para produção de um par de elétron-íon e q é a carga do elétron.

O modo de operação MSV é mais utilizado para medições em feixes de radiação mista, quando a carga produzida por um tipo de radiação é muito diferente daquela do segundo tipo. Na operação no modo de corrente, a resposta do detector refletirá linearmente as cargas contribuídas de cada tipo. No modo MSV, entretanto, o sinal

derivado é proporcional ao quadrado da carga por evento. Este modo operacional irá, portanto, ponderar ainda mais a resposta do detector em favor do tipo de radiação que dá a maior carga média por evento [KNOLL, 2010].

3.3.2 Eficiência de Detecção

A eficiência de detecção está associada ao tipo e à energia da radiação, e indica a probabilidade do detector registrar um evento. É conveniente classificar a eficiência em dois tipos: absoluta e intrínseca. A eficiência absoluta (ϵ_{abs}) depende das propriedades do detector e dos detalhes da geometria (principalmente do ângulo sólido do detector) e é definida por KNOLL [2010]:

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos pela fonte}} \quad (3.10)$$

Por outro lado, a eficiência intrínseca depende somente das características do detector e é definida por KNOLL [2010]:

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos incidentes no detector}} \quad (3.11)$$

No caso de fonte isotrópica, as eficiências estão relacionadas por KNOLL [2010]:

$$\epsilon_{gint} = \epsilon_{abs} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \quad (3.12)$$

onde Ω é o ângulo sólido do detector visto da posição da fonte.

3.3.3 Número de Pares de Elétrons e Íons Produzidos no Gás

Além dos processos enumerados anteriormente, outros mecanismos, como a excitação atômica, podem incorrer na absorção de energia sem que haja a ejeção de elétrons. A energia média para produção de um par elétron-íon ($\overline{W}$) depende das características do meio em que ocorre a interação. Por isso, é importante avaliar se a partícula depo-

sitou toda a sua energia no gás ou apenas parte dela, o que afetaria o sinal observado pelo detector.

Para um detector preenchido com uma mistura de gás argônio e dióxido de carbono, por exemplo, pode-se calcular o número de cargas primárias formadas pela Equação 3.13 [SAULI, 1977]:

$$n_p = E_\gamma \left(\frac{r_{Ar}}{\overline{W}_{Ar}} \right) + E_\gamma \left(\frac{r_{CO_2}}{\overline{W}_{CO_2}} \right) \quad (3.13)$$

onde n_p é o número de cargas primárias, E_γ é a energia da radiação depositada no gás, r_{Ar} e r_{CO_2} são, respectivamente, as quantidades relativas de argônio e dióxido de carbono presentes no gás que preenche o detector, e $\overline{W}_{Ar}$ e $\overline{W}_{CO_2}$ são as energias médias para produção de um par de íons para o argônio e o CO_2 , respectivamente.

3.3.4 Velocidade de Deriva

Os elétrons e os íons formados pelo processo de ionização tendem a se difundir termicamente no volume de gás e a se recombinar. Contudo, ao se aplicar um campo elétrico externo, surgirá um movimento dos portadores de carga, colidindo com as moléculas neutras do gás, na direção do campo elétrico. A velocidade média deste movimento é denominada velocidade de deriva.

Devido à diferença de massa, a velocidade de deriva de íons e elétrons em um dado campo elétrico difere em várias ordens de magnitude, de forma que, em comparação com os íons, os elétrons atingem grande aceleração entre as colisões.

A velocidade de deriva dos íons é, de forma aproximada, linearmente proporcional ao campo elétrico reduzido (razão entre o campo elétrico e a densidade do gás em questão). No entanto, para os elétrons, essa dependência é mais complexa. Os elétrons podem adquirir energia entre colisões, atingindo um valor máximo em campos elétricos de algumas centenas de V/cm, podendo saturar e até diminuir de velocidade dependendo da mistura de gases [SAULI, 2014].

Em alguns gases, como os hidrocarbonetos e as misturas de hidrocarboneto com argônio, pode ocorrer um efeito de saturação na velocidade de deriva, atingindo um valor máximo, e até diminuindo de intensidade, para altos valores de campo elétrico. Em gases, como o nitrogênio, o hidrogênio e o argônio puros, a velocidade de deriva cresce continuamente para grandes valores de campo elétrico reduzido [RAJU, 2005].

3.3.5 Relação entre Tensão e Carga Coletada

A carga total coletada pelo eletrodo está relacionada com a diferença de potencial aplicada entre o anodo e o catodo.

Quando é aplicada uma baixa tensão entre os eletrodos, há chances de alguns elétrons se difundirem e recombinaem com moléculas do gás, neutralizando as cargas que não estão sendo contabilizadas no sinal observado. Aumentando a tensão, chega-se em uma região denominada região de saturação, faixa em que trabalham as câmaras de ionização. Nessa tensão, as cargas coletadas são aproximadamente iguais às produzidas pelo processo de ionização. É nessa região de tensão que atuam as câmaras de ionização. Aumentando-se ainda mais a tensão, chega-se à região denominada região proporcional. Nesse caso, o campo elétrico é capaz de acelerar os elétrons de modo a fornecer energia suficiente para que eles ionizem outras moléculas do gás, mantendo uma correlação com a posição de ionização, e a quantidade de cargas coletadas é proporcional àquelas provenientes da interação da radiação com as moléculas do gás. O fenômeno de multiplicação de cargas no gás é chamado de efeito avalanche [SAULI, 2014].

A partir dessa região, o número de cargas coletadas deixa de ser proporcional às provenientes da radiação.

3.3.6 Efeito Avalanche

A partir de um determinado valor de campo elétrico, os elétrons adquirem energia suficiente para induzir processos inelásticos em suas colisões, excitando e ionizando as moléculas de gás. Como resultado, um novo par de elétron-íon é formado. Esse processo

de multiplicação de carga continua em avalanche, com os elétrons rápidos na frente e uma cauda de íons mais lentos atrás. A dependência entre a tensão e a corrente resultante tem um formato exponencial característico, como mostra a Figura 3.2 [SAULI, 2014].

Figura 3.2: Dependência entre tensão e corrente resultante no argônio em pressão atmosférica e temperatura de 20°C. O patamar observado refere-se à região de saturação. A partir de 3000 V é possível observar a curva exponencial causada pelo efeito avalanche (região proporcional). Reprodução de [SAULI, 2014].

O fator de multiplicação G , também denominado ganho de gás, representa o número total de elétrons criados pelo efeito avalanche a partir de um único elétron. Em caso de campo elétrico uniforme, pode ser calculado a partir da Equação 3.14 [SAULI, 2014]:

$$G = N(x)/N_0 = e^{\alpha \Delta x} \quad (3.14)$$

onde N_0 é o número de elétrons primários, $N(x)$ é o número de elétrons presentes na avalanche, após uma distância percorrida Δx ao longo do campo elétrico, e α representa o número médio de ionizações por unidade de comprimento (coeficiente de Townsend), que está relacionado com a seção de choque (σ) pela Equação 3.15:

$$\alpha = N\sigma \quad (3.15)$$

onde N é o número de moléculas por unidade de volume.

3.4 Detectores Gasosos Microestruturados

A necessidade da Física Experimental de determinar as trajetórias das partículas impulsionou o desenvolvimento da *MultiWire Proportional Chamber* (MWPC). O MWPC consiste em um conjunto de fios aterrados, paralelos e igualmente espaçados, colocados simetricamente entre dois planos mantidos em uma alta tensão, configurando um campo elétrico. Como em um contador proporcional, os elétrons criados no volume de gás por um evento ionizante são encaminhados ao longo das linhas de campo elétrico que se aproximam da região do campo elétrico alto (próximo aos fios do ânodo), onde a multiplicação de avalanches pode ocorrer. Considerando que cada elétron é direcionado ao fio mais próximo e o resultado da multiplicação é proporcional ao efeito de ionização da partícula detectada, é possível determinar a posição de interação dentro do detector [CHARPAK et al., 1968].

O advento de tecnologias de microfabricação e micropadronização permitiu o desenvolvimento de detectores no conceito *MicroPattern Gaseous Detector* - MPGD (detectores gasosos microestruturados), de forma a atender aos requisitos cada vez mais exigentes dos experimentos de física de partículas, como: posição aprimorada e maior capacidade de fluxo de partículas comparadas ao MWPC [SAULI, 2014].

Alguns exemplos de MPGD, são: *Micro-Strip Gas Chamber* (MSGC) [OED, 1988], o *MICROMEsh Gaseous Structure* (MICROMEGAS) [GIOMATARIS et al., 1996] e o *Gas Electron Multiplier* (GEM) [SAULI, 1997], dentre vários outros.

3.4.1 *Micro-Strip Gas Counter*

O *Micro-Strip Gas Counter* (MSGC), desenvolvido por OED [1988], é considerado como o primeiro MPGD. O MSGC é composto por um substrato de quartzo onde são impressas tiras condutoras alternadas de catodo e anodo. Ao aplicar uma diferença de potencial entre eles é possível criar uma região de multiplicação próxima aos anodos enquanto os íons são coletados nas tiras do catodo. Usando tecnologias fotolitográficas padrão, pode-se obter uma distância entre tiras condutoras de cem microns ou menos em relação ao MWPC. A Figura 3.3 mostra a configuração do campo elétrico no detector MSGC.

Figura 3.3: Configuração do campo elétrico no detector do tipo MSGC nas proximidades das tiras condutoras. A região de multiplicação está localizada próxima ao anodo. Adaptação de [SAULI, 2014].

3.4.2 *Micromesh Gaseous Structure*

O desenvolvimento bem-sucedido de estruturas de múltiplos fios e micro-fitas de anodo fino impulsionou a pesquisa sobre multiplicação de elétrons em campos elétricos uniformes. Observou-se que a dependência exponencial do ganho na região de multi-

plicação e a sensibilidade a defeitos intrínsecos à fabricação resultam em uma operação instável. No entanto, em espaços pequenos, devido à configuração de campos elétricos altos, grandes ganhos podem ser alcançados, com uma sensibilidade reduzida a variações e imperfeições [SAULI, 2014]. Este conceito levou ao desenvolvimento do detector MICROMEGAS [GIOMATARIS et al., 1996].

O MICROMEGAS consiste em uma fina micro-malha de metal posicionada a uma pequena distancia ($50\text{ }\mu\text{m}$ a $100\text{ }\mu\text{m}$) do eletrodo de leitura (anodo). O catodo é posicionado acima da micro-malha. A configuração do campo elétrico conduz os elétrons livres próximos à micro-malha onde o alto campo elétrico multiplica os elétrons. Este dispositivo é capaz de obter ganhos muito grandes com uma supressão muito boa do fluxo de íons intrínseco, que pode alterar o campo elétrico e influenciar o funcionamento do detector. A Figura 3.4 mostra a configuração do campo elétrico no detector.

Figura 3.4: Configuração do campo elétrico no detector do tipo MICROMEGAS nas proximidades da micro-malha. Adaptação de [SAULI, 2014].

3.4.3 *Gas Electron Multiplier*

O detector do tipo *Gas Electron Multiplier* (GEM) foi proposto pela primeira vez no *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), por Fabio Sauli em 1997 [SAULI, 1997]. Sua operação consiste em uma fina folha de polímero revestida de metal quimicamente perfurada por uma alta densidade de orifícios (tipicamente 100 por mm^2) e imersa em um gás, como mostra a Figura 3.5.

É então aplicado um potencial nos dois lados da folha, criando um campo elétrico dentro de cada orifício que atua como um contador proporcional independente, multiplicando os elétrons liberados por radiação ionizante no gás pelo efeito avalanche [BOUCLIER et al, 1997]. Devido à alta densidade de furos, o fator de multiplicação (ganho) não é afetado pela carga espacial ou por fluxos de radiação muito altos. A Figura 3.6 mostra a configuração do campo elétrico no detector do tipo GEM.

Figura 3.5: Imagem realizada por um microscópio eletrônico de um eletrodo do tipo GEM típico, com $50\ \mu\text{m}$ de espessura. O passo e o diâmetro dos furos são $140\ \mu\text{m}$ e $70\ \mu\text{m}$, respectivamente. Reprodução de [SAULI, 2016].

Figura 3.6: Configuração do campo elétrico no detector do tipo GEM dentro dos orifícios e nas proximidades. Adaptação de [SAULI, 2014].

A placa perfurada é inserida entre dois eletrodos, de forma que, com uma escolha adequada da tensão, todos os elétrons liberados na ionização causada pela radiação incidente no gás (região de deriva) são desviados para os orifícios, e a maioria dos elétrons gerados nas avalanches são direcionados para o eletrodo inferior (região de indução) para coleta do sinal.

Diferente dos outros MPGD, a multiplicação de avalanches no GEM ocorre quase inteiramente no campo elétrico dentro dos furos. Desse modo, o ganho é apenas levemente afetado por campos elétricos externos e é insensível ao formato da folha, flexibilizando consideravelmente os requisitos mecânicos. Separado da placa de amplificação, o plano de coleta e leitura da carga pode ser padronizado à vontade com tiras, blocos ou uma combinação dos dois. Embora sejam fabricados em sua maioria com geometria retangular, os eletrodos podem ser facilmente modelados para atender aos requisitos experimentais, incluindo a possibilidade de detectores não planos. A Figura 3.7 mostra dois exemplos de eletrodos do tipo GEM: Um eletrodo semicircular desenvolvido para o rastreador direto do experimento no CERN e o um eletrodo curvo para uma câmara de

projeção de tempo radial [SAULI, 2016].

(a)

(b)

Figura 3.7: Exemplos de eletrodos do tipo GEM não retangulares. (a) Um eletrodo GEM semicircular, com 30 cm de diâmetro; (b) um conjunto de eletrodos GEM cilíndricos. Reprodução de [SAULI, 2016].

Métodos de fabricação alternativos que utilizam a perfuração mecânica ou a laser de suportes mais espessos, geralmente com um passo de orifício maiores, foram desenvolvidos para aplicações que exigem precisão de localização moderada [PERIALE et al., 2002; CHECHIK et al., 2004; BADERTSCHER et al., 2010]; eles são geralmente referidos como *Thick GEM* (TH-GEM).

O detector TH-GEM, que é o foco deste trabalho, é uma variação do detector GEM. Sua estrutura assemelha-se à de uma escala ampliada, com dimensões 10 vezes maiores do que o GEM. Detectores do tipo TH-GEM fabricados com placa de circuito

impresso são multiplicadores robustos que apresentam ganhos altos e sinais rápidos na ordem de ns [CHECHIK et. al., 2004]. A vantagem dos detectores TH-GEM em relação aos detectores GEM são: simplicidade de construção, baixo custo e robustez [BRESKIN et al., 2009].

A seguir será descrito em detalhes o funcionamento de um detector tipo TH-GEM, suas configurações e aspectos importantes para este trabalho.

3.5 Detectores do tipo TH-GEM

O detector do tipo TH-GEM consiste em uma folha polimérica revestida em ambos os lados por material metálico, denominada neste trabalho folha de amplificação. Esta é perfurada em um padrão micrométrico e imersa em gás. É então aplicada uma diferença de potencial elétrico entre os revestimentos de ambos os lados da folha, criando assim uma configuração de campo elétrico intenso dentro de cada orifício.

A placa de amplificação é colocada entre dois eletrodos de mesmo tamanho (catodo e anodo) a fim de se criar um campo elétrico uniforme. A região entre o catodo e a face superior da placa amplificadora denomina-se região de deriva, e o campo elétrico nessa região é denominado campo de deriva. A região entre a face inferior da placa de amplificação e o anodo denomina-se região de indução, e o campo elétrico nessa região é denominado campo de indução, como mostra a Figura 3.8.

Figura 3.8: Regiões adjacentes ao plano do TH-GEM, em operação. A placa de amplificação está indicada como GEM. Adaptação de [BALAU, 2007].

Na região de deriva, dá-se a interação da radiação ionizante incidente com o gás que preenche o detector. Essa interação resulta na formação dos pares elétrons-íons, que, sob a ação do campo elétrico existente nessa zona, se dirigem para o eletrodo correspondente (íons para o catodo e elétrons para a face inferior da placa amplificadora).

Dessa forma, sob a ação do campo elétrico, os elétrons são direcionados para o interior dos orifícios onde são multiplicados, pelo efeito avalanche. A carga resultante dessa multiplicação é então conduzida pelo campo de indução para o anodo (placa coletora de carga), de forma que a amplitude do sinal de saída seja proporcional ao número inicial de pares de íons produzidos pelo feixe de radiação incidente.

A Figura 3.9 apresenta um corte transversal do detector tipo TH-GEM, onde E_d é o campo elétrico na região onde a radiação incidente interage com o gás produzindo um elétron e V_d é a tensão para a coleta desse elétron (zona de deriva). O índice o representa a região de um orifício da folha polimérica, sendo E_o e V_o o campo elétrico na região onde ocorre a avalanche de ionizações e a tensão necessária para isso ocorrer. Por último, V_i é a tensão necessária para guiar os elétrons na região do campo elétrico E_i , até a placa coletora (zona de indução).

Figura 3.9: Ilustração esquemática de um detector do tipo GEM. Adaptação de [CORTESI et al., 2007].

Entretanto, dependendo da configuração dos campos elétricos, nem todos os elé-

trons primários (gerados pela ionização do gás pela radiação incidente) chegam aos orifícios, ou os elétrons secundários (após a multiplicação pelo efeito avalanche nos orifícios) chegam ao anodo. Dessa forma, são definidos dois conceitos importantes para a caracterização dos detectores do tipo TH-GEM, a eficiência de coleção e a eficiência de extração.

A eficiência de coleção é a proporção de elétrons gerados na zona de deriva que atingem a zona de multiplicação, ou seja, representa a capacidade do campo elétrico na zona de deriva de conduzir a carga gerada devido à ionização da radiação (carga primária) até a zona de multiplicação (interior dos orifícios). A eficiência de extração representa a capacidade do campo elétrico de indução de extrair os elétrons de dentro do orifício e direcioná-los para o anodo.

Além das eficiências de coleção e extração, os detectores do tipo TH-GEM podem ser caracterizados em termos de ganho efetivo e ganho absoluto.

O ganho absoluto é o fator de multiplicação da placa de amplificação. É definido como a razão entre os elétrons secundários (tanto os que chegam ao anodo como os que ficam na face inferior da placa de amplificação) e os elétrons primários que chegam aos orifícios.

O ganho efetivo é definido como a razão entre as cargas que chegaram ao anodo e a carga primária. O ganho efetivo está relacionado pela Equação 3.16 com a eficiência de coleta (e_{col}), eficiência de extração (e_{ex}) e ganho absoluto (G_{abs}) [Souza, 2019]. Em resumo, o ganho efetivo reflete a eficiência do detector do tipo TH-GEM como um todo.

$$G_{eff} = e_{col} \cdot G_{abs} \cdot e_{ex} \quad (3.16)$$

A seleção do gás desempenha um papel importante, já que todo o processo de ionização, espalhamento e multiplicação ocorre no gás. Existem diferentes tipos de gases e misturas de gases que podem ser usados. Os principais critérios para a escolha do gás são: proporcionar um ganho estável, não possuir alta conexão eletrônica e ter energias de ionizações muito baixas. As misturas de gases mais utilizados são: Ar/CO₂, Xe/CO₂

e Ar/CH₄ nas razões 90/10, 80/20 e 70/30, respectivamente. A mistura Ar/CO₂ é a mais utilizada, devido ao ponto de ruptura conhecido em várias pressões e pela maior disponibilidade do argônio, comparado ao xenônio [SIPAJ, 2012].

3.6 Aplicações Dosimétricas e Produção de Imagens

Variações dos detectores do tipo GEM ou TH-GEM têm sido estudados para microdosimetria bidimensional sensível à posição para medir dose equivalente de nêutrons [MOSLEHI & RAISALI, 2017], feixes mistos de nêutrons e de radiação gama [DARVISH-MOLLA et al., 2018], feixes de raios X produzidos por elétrons monoenergéticos de 6 MeV direcionados a um alvo de tungstênio [FUJIWARA et al., 2013], feixes de prótons entre 130 MeV e 190 MeV [TIMMER et al., 2002; SERVALLI et al., 2009; AZA et al., 2017] e feixes de partículas alfa de 360 MeV [SERAVALLI et al., 2007].

Em alguns desses casos o detector é associado a um dispositivo de carga acoplada (*Charge-Coupled Device* - CCD) como mostra a Figura 3.10. Nestes casos, a luz emitida pelas ionizações é direcionada por um espelho para o dispositivo CCD, onde é realizada a avaliação do sinal.

Figura 3.10: Exemplo de arranjo experimental de detectores do tipo GEM associados a dispositivos CCD. Neste caso, é apresentado um GEM de folha dupla associado a um dispositivo CCD para dosimetria 2D em feixes de prótons para radioterapia. Adaptação de [TIMMER et al., 2002].

Em outros casos, o sinal elétrico é analisado diretamente, geralmente no modo pulso. A Figura 3.11 mostra o esquema simplificado de um contator proporcional de tecido equivalente (*Tissue Equivalent Proportional Counter* - TEPC) baseado em um detector do tipo TH-GEM para microdosimetria bidimensional de feixes mistos de radiação de nêutrons e gama. Neste caso, é utilizado um pré-amplificador sensível à carga, e um processador de sinal digital para a aquisição de dados [DARVISH-MOLLA et al., 2018].

(a)

(b)

Figura 3.11: (a) Esquema simplificado de um detector do tipo TH-GEM em uma câmara cavitária para dosimetria 2D de feixes mistos de nêutrons e radiação gama (b) Imagem da base de alumínio com as camadas do detector TH-GEM construídas. Adaptação de [DARVISH-MOLLA et al., 2018]

A Figura 3.12 mostra a comparação entre valores obtidos para taxa de dose com um detector do tipo GEM (preenchido com uma mistura de Ar/CF_4 na razão 90/10) associado a um picoamperímetro e valores obtidos com uma câmara de ionização calibrada [FUJIWARA et al., 2013]. As medições foram feitas para fótons de alta energia (6 MeV) e apesar dos dados apresentarem uma boa concordância, a falta de estimativas de incertezas impede a avaliação do GEM como dosímetro.

Figura 3.12: Corrente medida pelo picoamperímetro do detector do tipo GEM (pontos em vermelho) versus a taxa de dose de raios X de 6 MeV determinada com uma câmara de ionização calibrada (linha verde). Reprodução de [FUJIWARA et al., 2013].

Uma das aplicações dos detectores do tipo GEM em dosimetria 2D é no monitoramento de feixes em programas de garantia de qualidade, sendo possíveis medições das dimensões do feixe e da homogeneidade do campo de radiação. A Figura 3.13 mostra a distribuição de contagens obtida para varredura de um feixe de prótons (133 MeV) em um estudo para utilização de detectores do tipo GEM para este propósito [AZA et al., 2017].

Figura 3.13: Distribuição de contagens para um feixe de prótons de 133 MeV obtido com um detector do tipo GEM de 5 cm x 5 cm para monitoramento. Reprodução de [AZA et al., 2017].

Em relação à dosimetria médica, a caracterização e a calibração de um detector do tipo Triplo-GEM (utilizando três placas de amplificação) foram realizadas por MOROS e SERRATO [2021] para fontes radioativas (Fe-55, Sr-90, Tl-204 e Am-241) e para raios X (tensão no tubo de 40 kV a 125 kV e corrente do tubo de 0,1 mA a 100 mA). Neste trabalho verificou-se que o detector opera na região proporcional e a taxa de dose foi obtida a partir de três métodos diferentes: informações de corrente, espectro de energia e sinal de um osciloscópio [MOROS & SERRATO, 2021].

Outra das potencialidades do uso de detectores do tipo GEM está na produção de imagem com raios X e tomografia computadorizada tridimensional de alta resolução [CORTESI et al., 2007; HANU, 2013; FUJIWARA et al., 2017; SOUZA, 2019]. Com isso, abre-se a possibilidade de obtenção de imagens radiográficas ou tomográficas, utilizando detectores do tipo GEM, cuja informação de contraste represente quantitativamente níveis de dose absorvida pelo corpo imageado.

A Figura 3.14 mostra uma flor e sua respectiva imagem de transmissão de raios X realizada com um detector do tipo GEM. Neste caso, a placa de amplificação é constituída de vidro fotocondicionável (vidro de silicato de alumínio dopado com cério-prata) revestido por Cu/Cr (Cobre e Cromo) e o detector é preenchido por uma mistura dos gases argônio e metano na razão 90/10. O arranjo experimental assemelha-se com o apresentado na Figura 3.10 e foi utilizado um tubo de raios X com tensão de 20 kV e corrente de 100 μ A [FUJIWARA et al., 2017].

Figura 3.14: Exemplo da utilização de detectores do tipo GEM para produção de imagens com raios X. (a) Imagem óptica da flor utilizada para demonstração; (b) imagem de transmissão de raios X obtida utilizando um detector do tipo GEM. Reprodução de [FUJIWARA et al., 2017].

A Figura 3.14b mostra que o detector do tipo GEM utilizado apresenta uma ampla faixa dinâmica, uma vez que é possível observar detalhes do objeto imageado, tanto nas áreas mais claras como nas mais escuras.

A Figura 3.15 mostra a imagem 3D de um comprimido medicinal, onde é possível observar regiões de contraste que evidenciam a estrutura interna do objeto imageado. Neste caso, utilizando um arranjo experimental semelhante ao descrito anteriormente, foram tiradas 720 imagens em um passo de varredura de $0,5^\circ$ até completar 360° . Cada imagem foi gravada com um tempo de exposição de 5s e a imagem 3D foi reconstruída a partir dessas imagens por um algoritmo de retroprojeção filtrado [FUJIWARA et al., 2017].

Figura 3.15: Exemplo de tomografia computadorizada tridimensional de alta resolução realizada com um detector do tipo GEM. (a) Fotografia do comprimido a ser imageado; (b) imagem 3D reconstruída e em cada eixo do comprimido utilizando um detector do tipo GEM. Reprodução de [FUJIWARA et al., 2017].

O uso de detectores desse tipo para realização de imagens de grandes áreas com feixes de raios X de baixas energias (<10 keV) tem se mostrado especialmente útil, pois nele o processo de avalanche é capaz de amplificar pequenos sinais com ganhos de até 10^4 , diminuindo o tempo de integração necessário para gerar uma imagem de qualidade, comparados aos detectores de estado sólido [FUJIWARA et al., 2018].

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento deste projeto, como o sistema de radiação, sistemas de medição e instrumentos auxiliares. Além disso são descritas as ferramentas computacionais utilizadas e a metodologia para avaliação de incertezas.

Para os testes experimentais o detector foi preenchido com a mistura de gás disponível composto por 90% de argônio e 10% de metano. Na saída do gás foi utilizada uma válvula de retenção que abre quando a pressão dentro do detector atinge o valor de 107 kPa.

4.1 Sistema de Radiação

Para os testes experimentais foi utilizado uma miniatura de fonte de raios X da marca Amptek, modelo mini-X, que opera entre 10 kV e 50 kV e entre 5 μ A e 200 μ A, do IFUSP.

Para as simulações, foi utilizado o espectro de radiação da qualidade de mamografia WMV28 estabelecida no LCI no equipamento de raios X da marca Pantak/Seifert, modelo ISO-VOLT 160HS que possui anodo de tungstênio. O espectro foi obtido em trabalho anterior por [Silva, 2016] por meio de um modelo semi-empírico, descrito em [BOONE et al., 1997], desenvolvido para gerar os espectros de sistemas de raios X com anodo de molibdênio, ródio e tungstênio, utilizando interpolação de polinômios. Foi utilizada a lei de Lambert-Beer, que relaciona a transmissão da radiação com a espessura

da camada de um meio absorvedor, para incluir no modelo a capacidade de se adicionar as atenuações dos filtros. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros estabelecidos da qualidade de radiação utilizada e a Figura 4.1 mostra o espectro obtido.

Tabela 4.1: Parâmetros da qualidade de radiação padronizada de mamografia (WMV28) estabelecida no sistema de radiação do LCI [CORRÊA et al., 2012].

Qualidade de Radiação	Tensão do Tubo (kV)	Corrente do Tubo (mA)	Filtração do Tubo (mm)	Camada Semirredutora (mm)	Taxa de Kerma no Ar (mGy/min)
WMV28	28	10	0,07 Mo	0,37	$11,20 \pm 0,20$

Figura 4.1: Espectro da qualidade padronizada de mamografia WMV28 no LCI/IPEN. Reprodução de [SILVA, 2016].

A nomenclatura WMV, definida pelo laboratório padrão primário alemão *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), é referente às qualidades de mamografia estabelecidas em um sistema de radiação com anodo de tungstênio (W) com filtração adicional de molibdênio [CORRÊA, 2012].

4.2 Sistemas de Medição e Instrumentos Auxiliares

Para os testes realizados foram utilizados os seguintes sistemas de medição:

1. Fonte de alimentação VME da marca CAEN modelo V6521HN com 6 canais. Cada canal opera de 0 V a -6000 V e fornece uma corrente máxima de 20 μA .
2. Picoamperímetro da marca Levell Eletronics, modelo TM98.
3. Duas fontes de alta tensão da marca Ortec, modelos 428 e 470, que operam entre -1 kV e 1 kV e -2 kV e 2 kV, respectivamente.

Um microcomputador Intel® Core™ i7-7700 foi utilizado para as simulações e análises dos dados.

4.3 Ferramentas Computacionais

O Método de Monte Carlo é um método estocástico baseado na geração de números aleatórios utilizados para amostrar funções densidade de probabilidade para diversos problemas físicos. Neste trabalho esse método foi utilizado para amostrar funções densidade de probabilidade associadas à geração, ao transporte e à interação da radiação ionizante com a matéria. Para isso, foram utilizados os códigos descritos a seguir.

Para a determinação da geometria do detector, o código de transporte de radiação MCNP5 (*Monte Carlo N-Particle*) [LOS ALAMOS LABORATORY, 2008] foi utilizado. Trata-se de um *software* proprietário, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Los Alamos (LANL), para transporte de fótons e nêutrons e posteriormente incorporado para o transporte de elétrons também. Destaca-se de outros códigos pela versatilidade e simplicidade na construção de geometrias e fontes. As bibliotecas responsáveis pelas funções de amostragem, necessárias para simular o transporte da radiação, utilizam o banco de dados do NIST (National Institute of Standards and Technology) [CINTRA, 2010].

Para as simulações utilizando o código MCNP5 foram necessários alguns parâmetros de entrada como: a geometria, os materiais, as densidades dos meios, o arranjo

experimental, as características da fonte de radiação e os *tallies* (estimadores padrões para superfícies e/ou volumes). Neste trabalho foi utilizado apenas um dos sete *tallies* à disposição do usuário, o tally *F8. Esse *tally* especificamente fornece a resposta em MeV/partícula e consiste em uma média das energias depositadas amostradas ao longo da história de todas as partículas simuladas. Como a deposição de energia é obtida explicitamente por meio das colisões simuladas, o tally *F8 é adotado como tally padrão para dosimetria.

Além do MCNP5, foi utilizada também uma cadeia de códigos de simulação da seguinte forma:

1. Gmsh [GEUZAIN & REMACLE, 2009]: *Software* livre utilizado para definir a geometria e a malha de elementos finitos adequada, os dados são então importados para o software Elmer;
2. Elmer [RUOKOLAINEN et al., 2018]: *Software* livre capaz de resolver equações diferenciais para diferentes problemas físicos, como em mecânica estrutural, eletromagnetismo, dinâmica dos fluidos e transferência de calor. Foi utilizado para análise do elementos finitos gerados no Gmsh para o cálculo dos potenciais eletrostáticos. Os resultados foram importados para o Garfield ++ para uso nas simulações;
3. Garfield++ [SCHINDLER, 2017]: *Software* livre, baseado em Fortran e desenvolvido pelo CERN, utilizado para simulação de detectores a gás. Permite fazer cálculos detalhados dos múltiplos aspectos do transporte de carga e avalanche de ionizações em detectores gasosos;
4. Magboltz [BIAGI, 1995]: *Software* incorporado ao Garfield++ utilizado para descrever o gás como meio de interação.

Um dos parâmetros de entrada permitidos pelo Garfield++ é o coeficiente *Penning* para as misturas de gases. O coeficiente Penning é definido como a probabilidade de um

átomo excitado do gás nobre ionizar o gás auxiliar da mistura. Como essa probabilidade está relacionada com a transparência do gás, ela muda de acordo com a pressão, a temperatura e a concentração do gás [AZEVEDO et al., 2016]. Nas simulações, para a mistura Ar/CO₂, foram utilizados os valores 0,48 e 0,55 para o coeficiente Penning para as concentrações 90/10 e 80/20, respectivamente. Para a mistura de Argônio e Metano foi utilizado o valor de 0,22 para o coeficiente Penning para a concentração 90/10. Os valores foram obtidos para pressão de 107 kPa e temperatura de 20°C por [ŞAHIN et al., 2010].

4.4 Avaliação de Incertezas

Os cálculos neste trabalho foram feitos considerando as incertezas do tipo A e do tipo B. A incerteza do tipo A é baseada em métodos estatísticos válidos para o tratamento de dados. A incerteza do tipo B é obtida por outros meios que não a análise estatística. É baseada em julgamentos científicos, podendo ser obtida por dados de medições anteriores, conhecimento geral, especificações do fabricante dos instrumentos utilizados, dados provenientes de manuais ou publicações, procedimentos operacionais, condições ambientais e as incertezas provenientes dos certificados de calibração dos instrumentos utilizados nos ensaios.

Para estimar a incerteza do tipo A são obtidas durante os testes várias medições para as mesmas condições experimentais. Determina-se a média ($\bar{x}$) de uma série de medições, pela Equação 4.1, e consequentemente os desvios-padrão, pela Equação 4.2, onde N é o número de medições que foram realizadas para cada experimento [GUM, 2012].

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{x}_i \quad (4.1)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

Para as incertezas combinadas, foi utilizada a lei de propagação das incertezas, que pode ser observada na Equação 4.3 [GUM, 2012]:

$$\sigma_k = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial k}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (4.3)$$

onde $\frac{\partial k}{\partial x_i}$ é a derivada parcial da função k em relação a x_i , e σ_{x_i} é a incerteza de x_i .

A incerteza expandida, que define um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, é obtida pela multiplicação da incerteza combinada por um fator k . O fator k é escolhido com base no nível de confiança requerido para o intervalo. Neste trabalho será utilizado o fator k igual a 2, que corresponde a aproximadamente 95% de nível de confiança.

Capítulo 5

Resultados: Desenvolvimento do Detector do tipo TH-GEM

A seguir são apresentados os resultados obtidos por simulação na etapa de desenvolvimento do protótipo de um detector do tipo TH-GEM com características adequadas para o uso em feixes padronizados de mamografia. Nesta etapa, foram determinados a geometria e os materiais do detector do tipo TH-GEM, e foi feita a sua caracterização em termos de ganho absoluto e eficiências de coleção e extração.

5.1 Determinação da Geometria e dos Materiais

O código de transporte de radiação MCNP5 (Monte Carlo N-Particle) foi utilizado para se determinar a influência de cada componente do detector na energia depositada no volume sensível, utilizando seu sistema de importância. Com a importância zero em um determinado ambiente, as partículas que entram nesta região serão eliminadas. Dessa forma, esse espaço comportar-se-á como um absorvedor ideal, não gerando transmissão ou dispersão da radiação. Assim, para se avaliar a influência de cada componente do detector na energia depositada no volume sensível, foram realizadas simulações alternando sua importância para zero e comparando-as com o valor obtido com a importância 1. As dimensões do detector utilizadas são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dimensões do detector

Componente	Dimensão	Valor (mm)
Invólucro	Lados	110,00
	Espessura	12,95
	Altura	31,67
	Profundidade	26,39
Placa Coletora	Largura	59,80
	Comprimento	60,70
	Espessura do Cobre	0,03
	Espessura da Fibra de Vidro	1,53
Placa de Amplificação	Largura	59,80
	Comprimento	60,70
	Espessura do Cobre	0,03
	Espessura da Fibra de Vidro	0,50
	Diâmetro do Orifício	0,25
	Distância entre Orifícios	1,00
Blindagem	Lados	110,00
	Espessura	6,00
Janela de Entrada (Alumínio)	Lados	34,50
	Espessura	0,006
Janela de Entrada (<i>Mylar</i> Aluminizado)	Lados	34,50
	Espessura	0,127

Para invólucro do detector foi utilizado o material polioximetileno, com densidade de $1,41 \text{ g/cm}^3$ (dado do fabricante), por ser um material rígido e resistente, além de oferecer bom isolamento elétrico e boas características de usinagem. Para simplificar a construção do detector, foi determinado o formato quadrado da base, com lados de 110,00 mm.

As placas de amplificação e de coleta foram feitas de placas de circuito impresso de fibra de vidro, densidade $2,49 \text{ g/cm}^3$, revestidas por cobre, densidade $8,96 \text{ g/cm}^3$ [WILLIAMS III et al., 2006]. São separadas por espaçadores de 0,5 cm, também de polioximetileno.

O detector TH-GEM foi preenchido por gás argônio puro, com densidade de $1,66201 \times 10^{-03} \text{ g/cm}^3$ [WILLIAMS III et al., 2006]. Neste caso, foi utilizado argônio

puro para otimização da simulação.

O feixe de radiação foi simulado em formato cônico com diâmetro de 12 cm (característica do feixe real utilizado no LCI). O ponto focal da fonte de radiação foi colocado a uma distância de 100 cm da janela de entrada do detector, como estipulado para calibração de detectores em feixes de radiodiagnóstico. Foi utilizado o espectro da qualidade de radiação padronizada WMV28, como descrito no item 4.1.

A Figura 5.1 mostra o universo simulado com o MCNP5 e a Figura 5.2 mostra a geometria do detector do tipo TH-GEM modelada para a simulação com os materiais de cada componente. A janela de entrada e o revestimento de cobre das placas de circuito impresso não são visíveis na figura. O volume sensível é a região onde a energia depositada na simulação é obtida. Refere-se a um paralelepípedo na frente da região perfurada da placa de amplificação. Uma vista tridimensional do detector do tipo TH-GEM é apresentada na Figura 5.3.

Figura 5.1: Universo da simulação visualizada com o *software Vised X22S*. As linhas verdes representam a trajetória dos fótons do feixe de radiação. Os pontos vermelhos representam os fótons primários e secundários.

Figura 5.2: Seção transversal do detector TH-GEM modelado pelo código MCNP5, visualizado com o software Vised X22S. A cor vermelha representa o ar seco; Verde: blindagem de alumínio; Azul: gás argônio que preenche o detector; Amarelo: invólucros e separadores de polioximetileno; Cinza: placa de amplificação e coleta de fibra de vidro.

Figura 5.3: Vista tridimensional do detector TH-GEM modelado pelo código MCNP5 e visualizado com o *software* Vised X22S.

Os valores obtidos para a influência (em porcentagem) de cada componente na resposta do detector do tipo TH-GEM são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valores de influência obtidos para cada componente.

Componente	Influência (%)
Invólucro	0,09
Eletrodo Coletor	0,01
Blindagem	1,00
Placa de Amplificação	44,0

O invólucro do detector do tipo TH-GEM e a placa coletora apresentam influência insignificante. A placa de amplificação apresentou uma influência considerável (44%). Esse resultado leva em consideração os elétrons secundários emitidos.

A espessura da blindagem foi definida por simulação: a energia depositada no volume sensível foi observada e a espessura da blindagem foi aumentada até atingir um valor de eficiência de 99%, obtendo-se uma espessura necessária de 6 mm de alumínio.

Foram comparadas duas janelas de entrada disponíveis: uma folha de alumínio de 6 μm de espessura e uma folha de Mylar aluminizada, densidade de $1,123 \text{ g/cm}^3$ (dados do fabricante), com 0,123 mm de espessura, a fim de avaliar qual material teve menor influência na energia depositada no volume sensível. A Tabela 5.3 apresenta a diferença (em porcentagem) entre a energia depositada no volume sensível obtido com a simulação, com e sem cada janela de entrada. A menor influência foi observada para a janela de entrada de *Mylar* aluminizado.

Tabela 5.3: Valores de influência obtidos para cada janela de entrada.

Componente	Influência (%)
Alumínio	8,9
<i>Mylar</i> Aluminizado	0,33

Além disso, um muro de concreto de 15 cm de espessura, representando as paredes do laboratório, foi simulado atrás do detector às distâncias de 50, 30, 10, 5 e 1 cm, como mostra a Figura 5.4. Nenhuma diferença foi observada em nenhum dos casos, mostrando que não é necessária blindagem extra.

Figura 5.4: Universo da simulação com uma parede de concreto localizada atrás do detector do tipo TH-GEM. As linhas verdes representam a trajetória dos fótons do feixe de radiação. Os pontos vermelhos representam os fótons primários e secundários.

5.2 Caracterização em Termos de Ganho Absoluto

O ganho absoluto, como visto no item 3.5, é o fator de multiplicação da placa de amplificação. Pela complexidade de se medir o ganho absoluto experimentalmente, optou-se pelo uso de simulação computacional. Para isso, foram utilizados os *softwares* Garfield++ e toda a cadeia de *softwares* livres descritos no item 4.3.

A célula unitária, mostrada na Figura 5.5, foi modelada no Gmsh utilizando as dimensões da Tabela 5.1. Definindo-se uma periodicidade, foi possível gerar um buraco inteiro, que com as condições de contorno equivale a um plano infinito com as características da área perfurada da placa de amplificação.

Figura 5.5: Célula unitária da geometria modelada no Gmsh para as simulações no *software* Garfield++.

No Gmsh também foi gerada a malha de elementos finitos, como mostra a Figura 5.6.

Figura 5.6: Célula unitária modelada no Gmsh com uma vista 3D da malha de elementos finitos. Para melhor visualização, a malha na região do gás não está visível.

Os dados da geometria e a malha de elementos finitos foi gerada no Gmsh e importados para o *software* Elmer para o cálculo dos potenciais eletrostáticos. Dessa forma, foi possível visualizar a distribuição do campo elétrico dentro de um orifício da placa de amplificação, como mostra a Figura 5.7 e gerar um perfil do campo elétrico por uma linha transversal imaginária, que passa pelo cento do orifício para diferentes potenciais aplicados, como mostra a Figura 5.8. Os resultados foram obtidos para uma diferença de potencial de 1000 V aplicada às camadas de cobre da placa de amplificação.

A Figura 5.9 mostra os valores de campos elétricos máximos obtidos para diferentes tensões aplicadas à placa amplificação. É possível observar que o campo elétrico dentro dos orifícios varia de forma linear com o aumento da diferença de potencial na placa de amplificação.

As informações do campo elétrico foram então importadas do *software* Elmer para o Garfield++ para a simulação do transporte de carga e os processos de avalanche de ionizações no detector do tipo TH-GEM.

Figura 5.7: Distribuição do campo elétrico em V/cm dentro de um orifício da placa de amplificação, obtido pelo *software* Elmer. Foi utilizada a diferença de potencial de 1000 V entre as camadas de cobre da placa de amplificação.

Figura 5.8: Magnitude do campo elétrico por uma linha transversal imaginária que passa pelo centro de um orifício. Foi utilizada a diferença de potencial de 1000 V entre as camadas de cobre da placa de amplificação.

Figura 5.9: Valores máximos de campo elétrico obtido para cada tensão aplicada à placa de amplificação. Coeficiente de correlação linear $R^2 = 1,000$.

A Figura 5.10 apresenta uma simulação típica realizada no *software* Garfield++. Os traços laranja representam as trajetórias dos elétrons, incluindo a avalanche de elé-

trons dentro dos orifícios. Um único elétron foi produzido na região de deriva e guiado pelo campo de deriva até o interior do orifício, onde, pelo efeito avalanche, quatro novos elétrons foram gerados. Foi utilizada a diferença de potencial na placa de amplificação de 1000 V e o detector foi preenchido com a mistura de gás Ar/CO₂ na concentração 90/10.

Para cada valor de campo elétrico no interior de um orifício foi estimado um valor para o ganho absoluto resultante do efeito avalanche para 1000 elétrons gerados.

A Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos para as misturas: Ar/CO₂ nas concentrações 90/10 e 80/20 e para a mistura Ar/CH₄ na concentração 90/10. Essas misturas de gases foram escolhidas por serem misturas comumente utilizadas em detectores do tipo TH-GEM, por terem valores do coeficiente Penning encontrados na literatura e pela sua disponibilidade.

Figura 5.10: Avalanche de elétrons em um detector TH-GEM simulado com Garfield++. O eletrodo coletor não é visível na figura.

Figura 5.11: Ganho absoluto obtido por simulação em função da tensão aplicada à placa de amplificação para diferentes misturas de gases. A incerteza máxima foi de 6,8% para a mistura de Ar/CO₂ na concentração 90/10.

É possível observar que o maior ganho absoluto obtido é para o Ar/CO₂ na concentração 90/10, seguido pela mistura Ar/CH₄, com uma pequena diferença entre eles. Os gases CO₂ e CH₄ são comumente misturados ao argônio (gás inerte ionizado pela radiação) para aumentar a tensão limiar aplicada à placa de amplificação, devido à dissipação de grande porcentagem da energia de colisões nas vibrações moleculares, diminuindo a probabilidade de descargas no detector. Entretanto, é importante considerar que a adição desses gases também diminuem o ganho, tendo em vista que a mistura Ar/CO₂ na concentração 80/20 foi a que obteve o menor ganho.

5.3 Caracterização em Termos de Eficiências

Como visto no item 3.5, a eficiência de coleção (e_{col}) representa a capacidade do campo elétrico na zona de deriva de conduzir a carga primária até a zona de multiplicação. Essa eficiência pode ser determinada pela Equação 5.1 [SOUZA, 2019]:

$$e_{col} = 1 - \frac{Q_{top}}{Q_{prim}} \quad (5.1)$$

onde Q_{top} representa a quantidade de carga que ficou na camada de cobre superior da placa de amplificação e Q_{prim} a carga primária.

Por sua vez, a eficiência de extração (e_{ext}) representa a capacidade do campo elétrico na zona de indução de extrair os elétrons da zona de multiplicação e direcioná-los à placa coletora. Essa eficiência pode ser determinada pela Equação 5.2 [SOUZA, 2019]:

$$e_{ext} = \frac{Q_{ano}}{Q_{bot} + Q_{ano}} \quad (5.2)$$

onde Q_{ano} é a quantidade de carga que chega até a placa coletora e Q_{bot} a quantidade de carga que fica presa na camada de cobre inferior da placa de amplificação.

Os valores das eficiências foram obtidos utilizando também o *software* Garfield++ e toda a cadeia de códigos livres descritos no item 4.3. A geometria utilizada foi a mesma descrita no Item 5.2.

Para esta simulação foi gerado um elétron na região de deriva e foi registrada a posição final do elétron primário, assim como a posição final dos elétrons secundários gerados no processo de avalanche de ionizações.

Dessa forma, foram gerados oito mil elétrons primários para cada configuração de tensão. Os valores para a eficiência de coleção foram obtidos para diferentes intensidades de campo elétrico na região de deriva, como mostra a Figura 5.12. Para essas simulações foi mantido fixo o campo de indução no valor de 100 V/cm e a diferença de potencial na placa de amplificação igual a 100 V.

Figura 5.12: Resultados obtidos por simulação para as eficiências de coleção. O campo elétrico é referente ao campo elétrico na região de deriva. A diferença de potencial na placa de amplificação foi mantida em 100 V e o campo elétrico na zona de indução em 100 V/cm.

É possível observar na Figura 5.12 que a eficiência de coleção diminui para valores de campo de deriva mais intensos. Isso ocorre porque o campo de deriva se torna tão intenso que alguns dos elétrons primários não conseguem alcançar a zona de multiplicação e são perdidos para a camada de cobre superior da placa de amplificação. Entretanto, esse campo elétrico não pode ser extremamente baixo para evitar recombinação iônica (efeito não considerado na simulação).

Para a eficiência de extração, por sua vez, variou-se o campo de indução e o campo de deriva foi mantido fixo com o valor de 200 V/cm, como mostra a Figura 5.13. Para ambos os casos foi utilizada a diferença de potencial na placa de amplificação igual a 100 V. É possível observar que a eficiência de extração aumenta com o campo elétrico na região de indução. Isso ocorre porque, para campos elétricos baixos na região de indução, uma grande quantidade de elétrons é perdida para a camada de cobre inferior da placa de amplificação.

Figura 5.13: Resultados obtidos por simulação para as eficiências de extração. O campo elétrico é referente ao campo elétrico na região de indução. A diferença de potencial na placa de amplificação foi mantida em 100 V e o campo elétrico na zona de deriva em 200 V/cm.

5.4 Fluxo de Gás

O fluxo de gás foi simulado no Elmer para verificar a homogeneidade da renovação do gás por todo o detector do tipo TH-GEM. Para isso, foi simulada uma caixa com as dimensões do invólucro (Tabela 5.1) com conexões de gás (entrada e saída) em lados opostos. Foram adicionadas placas com as dimensões da placa de amplificação e coletora dentro da caixa simulada.

Na Figura 5.14, é mostrado o resultado obtido definindo-se um fluxo de 6 volumes por hora e fixada na saída do gás a pressão de 101,325 kPa. É possível observar um fluxo aproximadamente uniforme dentro do detector, principalmente nas regiões de deriva e de indução. As linhas do fluxo também são direcionadas diretamente para a saída, o que indica uma renovação constante do gás nessas regiões. Além disso, para essa configuração verificou-se que a pressão também se mantém homogênea.

(a)

(b)

Figura 5.14: Fluxo de gás dentro do detector obtido pelo *software* Elmer. As linhas representam o fluxo de gás e as cores representam as magnitudes de velocidades.
(a) Vista frontal do detector; (b) Vista lateral do detector.

Capítulo 6

Resultados: Construção do Detector do Tipo TH-GEM

Neste capítulo são apresentados os processos para a construção do detector do tipo TH-GEM. A Figura 6.1 mostra um desenho do detector montado, em uma visão explodida para a visualização de cada componente.

Figura 6.1: Visão explodida do detector do tipo TH-GEM construído para visualização de cada componente.

A construção do detector foi realizada na oficina mecânica do Laboratório de Análise de Materiais com Feixes Iônicos da Universidade de São Paulo (LAMFI-USP), que participa deste projeto na forma de colaboração institucional. Os componentes foram construídos com as dimensões apresentadas na Tabela 5.1 com incertezas de $\pm 0,05$ mm e os materiais utilizados são descritos no item 5.1

A seguir é relatado o processo de construção do invólucro, suportes, placa coletora, placa de amplificação, blindagem e janela de entrada. Além desses componentes, também foram utilizados quatro separadores de polioximetileno de $(5,00 \pm 0,05)$ mm, um anel de vedação, duas conexões de gás e três conectores BNC (uma para saída de sinal e dois para alimentação de alta tensão).

Foram feitas duas entradas para a alimentação de alta tensão, pela possibilidade de, tendo disponíveis diferentes fontes de alta tensão, variar separadamente as tensões aplicadas aos eletrodos do detector do tipo TH-GEM. Entretanto, pode-se, com o uso de resistores, aplicar as tensões necessárias utilizando uma única fonte e assim, utilizar uma única entrada.

6.1 Invólucro e Suportes

O invólucro foi construído na oficina de usinagem do LAMFI-USP, como mostra a Figura 6.2. Os suportes para a placa de amplificação foram construídos do mesmo material e acoplados ao invólucro, como mostra a Figura 6.3.

Figura 6.2: Construção do invólucro do detector na oficina de usinagem do Laboratório de Análise de Materiais com Feixes Iônicos da Universidade de São Paulo.

Figura 6.3: Os suportes para a placa de amplificação foram construídos do mesmo material e acoplados ao invólucro.

6.2 Placas de Amplificação e Coletora

Para a placa de amplificação foi utilizada uma placa de circuito impresso com revestimento de cobre dos dois lados. Para a placa coletora foi utilizada também uma placa de circuito impresso, mas esta revestida por cobre somente de um lado. Ambas as

placas receberam um tratamento químico, que criou uma cobertura fina de prata para evitar a oxidação.

A perfuração da placa de amplificação foi realizada utilizando um dispositivo CNC (*Computer Numeric Control*) construído no laboratório LAMFI-USP para uso interno na fabricação de pequenos circuitos impressos, com uma broca de 0,25 mm. A Figura 6.4 mostra as placas de amplificação e coletora já posicionadas no invólucro do detector.

Figura 6.4: Foto dos componentes do detector TH-GEM sem a blindagem. As conexões de gás e os fios para as ligações elétricas são visíveis na figura. A placa de amplificação consiste em uma placa de circuito impresso perfurada em um padrão hexagonal, com orifícios de $(0,254 \pm 0,021)$ mm de diâmetro e $(1,11 \pm 0,12)$ mm de distância entre eles.

Os diâmetros dos orifícios e a distância entre eles foram medidos com o auxílio de um código em Python capaz de detectar grupos de pixels que pertencem a um círculo e medir o diâmetro de cada círculo encontrado. A Figura 6.5 mostra a imagem da malha de furos utilizada para a detecção das circunferências.

Figura 6.5: Foto da malha de furos da placa de amplificação escaneada com resolução de 1200 dpi. Os círculos em vermelho são os orifícios detectados e medidos pelo código em Python.

6.3 Blindagem e Janela de Entrada

A blindagem utilizada, que também funciona como um dos eletrodos do detector (junto com a camada superior de cobre da placa de amplificação formam a região de deriva), é composta por duas placas de alumínio de 3 mm de espessura cada, totalizando os 6 mm necessários, valor este determinado por simulação no item 5.1. A janela de entrada foi posicionada entre as duas placas e o conjunto foi fixado no detector do tipo TH-GEM com parafusos, como mostra a Figura 6.6.

Figura 6.6: Conjunto das duas placas de alumínio que compõem a blindagem do detector e o posicionamento da janela de entrada.

Capítulo 7

Resultados: Caracterização Experimental

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a caracterização do detector do tipo TH-GEM. Esses testes foram realizados no LAMFI-USP do Instituto de Física da USP (IFUSP).

Os testes realizados foram: caracterização elétrica e caracterização em termos de ganho efetivo. Além disso, também foi possível verificar a linearidade da resposta com a variação da corrente no tubo de raios X.

Antes dos testes experimentais, a placa de amplificação foi submetida a um procedimento de limpeza para remover resíduos do processo de perfuração, passando por um banho ultrassônico de cinco minutos com álcool isopropílico (Figura 7.1), seguido de uma secagem em estufa por 20 horas a 50°C.

Figura 7.1: Banho ultrassônico com álcool isopropílico na placa de amplificação.

7.1 Caracterização Elétrica

Neste item são apresentados os resultados obtidos para a caracterização elétrica, realizada no High Energy Physics Instrumentation Center do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (HEPIC-USP), a fim de avaliar a qualidade da placa de amplificação produzida.

O teste foi realizado com a placa de amplificação dentro de uma câmara preenchida com um gás puro, à pressão atmosférica e fluxo lento contínuo. O gás Argônio foi escolhido para este teste pela disponibilidade e por ser um gás comumente utilizado nos detectores do tipo GEM e TH-GEM.

O teste consistiu na medição da corrente de fuga (corrente que flui através da fibra de vidro entre os planos condutores da placa de amplificação) em função da tensão aplicada entre os revestimentos de cobre da placa de amplificação. O equipamento utilizado para medições de tensão e corrente foi o módulo VME de alta tensão CAEN, descrito no item 4.2. Nesse procedimento, faíscas foram detectadas por queda de tensão e variação de corrente, eventos que foram acompanhados por uma centelha quase sempre visível. Assim, foi possível saber onde ocorreu a descarga elétrica.

Inicialmente, foram observadas centelhas em um único orifício, mesmo com uma diferença de potencial de 100 V aplicada entre os revestimentos, como mostra a Figura 7.2.

Ao se observar o orifício com o auxílio de uma câmara digital USB, foi possível verificar a existência de farpas de cobre devido à perfuração, como mostra a Figura 7.3.

Figura 7.2: Centelha em um único orifício com 100 V de tensão aplicada entre os revestimentos de cobre da placa de amplificação.

Figura 7.3: Foto da placa de amplificação ampliada, onde é possível observar: (a) uma farpa encontrada em um dos orifícios; (b) uma farpa encontrada em um orifício após observada uma centelha.

As farpas encontradas foram retiradas com o auxílio da broca utilizada no processo de perfuração. O banho ultrassônico com álcool isopropílico foi realizado novamente e após a secagem, a placa de amplificação foi posicionada de volta na câmara de teste. Esse procedimento foi repetido até se observar um padrão aleatório de faíscas nos orifícios, o que aconteceu a uma tensão de 1,0 kV. O padrão aleatório de faíscas indica que o limite

do isolamento elétrico do argônio foi atingido, portanto, essa foi considerada a tensão limite aplicável a esta placa.

Após esse processo de condicionamento, a aquisição de dados foi iniciada. As correntes de fuga foram registradas para tensões aplicadas entre 100,0 V e 1,0 kV, como mostra a Figura 7.4. Para cada valor de tensão foram obtidas dez medições de corrente.

Foram obtidos os valores de $(15,3 \pm 0,4) \text{ G}\Omega$ para o isolamento (resistência) e $(65,3 \pm 1,7) \text{ pS}$ para condutância da placa de amplificação. O valor da resistência foi determinado por meio da inclinação de uma regressão linear nos seis primeiros pontos de dados. A escolha desses pontos foi feita em relação à sua linearidade, uma vez que o sétimo ponto mostra uma tendência não linear, indicando que para a tensão de 600 V são observadas perdas de corrente. A condutância foi obtida pelo inverso da resistência.

Figura 7.4: Corrente medida em função da tensão aplicada à placa de amplificação. A incerteza máxima foi de $\pm 2\%$ e não é visível no gráfico.

As perdas de corrente observadas podem influenciar a intensidade do campo elétrico na zona de multiplicação, influenciando também a resposta do detector. Por isso, o valor de 600 V foi definido como limiar para a diferença de potencial aplicada à placa de amplificação construída.

7.2 Caracterização em Termos de Ganho Efetivo

Como definido no item 3.5, o ganho efetivo é a razão entre a corrente que atinge a placa coletora e a corrente primária, refletindo a eficiência do detector como um todo. Para a caracterização do detector do tipo TH-GEM em termos de ganho efetivo, foram obtidos os valores para a corrente primária e a corrente na placa coletora para diferentes valores de tensão aplicada à placa de amplificação.

Para isso, foi utilizado o mini equipamento de raios X descrito no item 4.1. No tubo de raios X foi utilizada a tensão de 28 kV, e a corrente foi variada entre 10 μA e 120 μA . Foram também utilizadas duas fontes de alta tensão da marca Ortec (totalizando três canais disponíveis), e o pico amperímetro, como mostra a Figura 7.5. As fontes de alta tensão e o pico amperímetro foram descritos no item 4.2.

O detector do tipo TH-GEM foi preenchido por Ar/CH_4 com a concentração de 90/10. Foi adicionada uma válvula na saída de gás do detector, que abre quando a pressão interna atinge o valor de 107 kPa.

Figura 7.5: Arranjo experimental para os testes com o detector do tipo TH-GEM no LAMFI-USP. O computador está ligado à mini fonte de raios X, onde é possível mudar a tensão e a corrente aplicada ao tubo. O cilindro de gás não é visível na foto.

A corrente primária foi obtida através do arranjo experimental apresentado na

Figura 7.6, sendo que para V_1 foi utilizada a tensão de 800 V.

Figura 7.6: Arranjo experimental para determinação da corrente primária. Para V_1 foi utilizada a tensão de 800 V.

A Figura 7.7 apresenta os resultados obtidos para a corrente primária. Como os valores variavam consideravelmente, foram realizadas três medições da resposta do detector para cada valor de corrente no tubo de raios X e a variação observada adicionada como incerteza do tipo B. Obteve-se um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0,98773.

Figura 7.7: Corrente primária coletada no detector para diferentes correntes no tubo de raios X. Obteve-se um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0,98773.

A corrente na placa coletora foi obtida por meio do arranjo experimental apresen-

tado na Figura 7.8. Foram utilizadas as tensões: 100 V para V_3 , 300 V para V_2 e 350 V para V_1 . Nessa configuração, a diferença de potencial aplicada na zona de deriva, na zona de multiplicação e na zona de indução foram de 50 V, 200 V e 100 V respectivamente. Utilizou-se a mesma metodologia para aquisição de dados utilizada para corrente primária.

Figura 7.8: Arranjo experimental para obtenção da corrente gerada na placa coletora.

A Figura 7.9 mostra os resultados obtidos para a corrente coletada na placa coletora para uma diferença de potencial de 200 V aplicada à placa de amplificação. Obteve-se um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0,9980, mostrando que a resposta do detector se aproxima de uma relação linear com a corrente no tubo do raios X. É possível observar que a linearidade da resposta do detector piora para correntes mais altas, diferente do esperado. Normalmente a linearidade da resposta do detector piora para correntes muito baixas devido à instabilidade do gerador de radiação. Entretanto, para grandes correntes existe mais dissipação de calor e potência no gerador, o que pode afetar o seu rendimento. Além disso, a influência das características do próprio detector pode afetar o resultado final das medições.

Figura 7.9: Corrente coletada no eletrodo coletor do detector para diferentes valores de corrente no tubo de raios X. Obteve-se um coeficiente de correlação linear (R^2) igual a 0,9980.

Para a determinação do ganho efetivo, foi feita a comparação entre a corrente primária e os valores obtidos na placa coletora. Dessa forma, o ajuste nos dados para corrente na placa coletora foi determinado em função do ajuste dos dados da corrente primária, obtendo-se um fator multiplicativo (representando o ganho efetivo). Foi escolhido o fator multiplicativo no qual o ajuste apresentou a menor diferença quadrática. O ganho efetivo obtido foi de $(1,45 \pm 0,10)$, como mostra a Figura 7.10.

Todo o procedimento foi repetido, variando-se a diferença de potencial aplicada à placa de amplificação. Todas as tensões aplicadas no detector do tipo TH-GEM foram variadas de forma a manter a diferença de potencial na região de deriva e de indução a mesma em todas as configurações, ou seja, o campo de deriva e indução se mantiveram constantes. Os testes foram realizados para as diferenças de potencial de 300 V, 400 V e 450 V. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 7.11, 7.12 e 7.13.

Figura 7.10: Determinação do ganho efetivo para uma diferença de potencial de 200 V à placa de amplificação. (a) Comparação do ajuste linear dos dados obtidos para corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho). (b) O fator 1,5 foi o que apresentou menor diferença quadrática neste caso.

Figura 7.11: Corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho), quando aplicada uma diferença de potencial de 300 V à placa de amplificação.

Figura 7.12: Corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho), quando aplicada uma diferença de potencial de 400 V à placa de amplificação.

Figura 7.13: Corrente primária (em azul) e a corrente na placa coletora (em vermelho), quando aplicada uma diferença de potencial de 450 V à placa de amplificação.

Na Figura 7.13 pode-se observar que não foi possível realizar o ajuste dos dados em função do ajuste da corrente primária somente com um fator multiplicativo. Neste caso, foi necessário um fator aditivo. Essa diferença mostra que nessa configuração houve a

presença de uma corrente de fuga não desprezível no sistema. Essa corrente de fuga pode ser devida a problemas de isolamento no detector.

A Figura 7.14 apresenta os valores de ganho efetivo para as diferenças de potencial de 200 V, 300 V, 400 V e 450 V aplicadas à placa de amplificação. É possível observar que ao se aumentar a diferença de potencial na placa de amplificação, o ganho aumenta exponencialmente.

Figura 7.14: Ganho efetivo obtido em função da diferença de potencial aplicada à placa de amplificação.

Desse modo, o ganho efetivo máximo obtido neste trabalho foi de $(2,20 \pm 0,10)$.

Capítulo 8

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento, a construção e a caracterização de um detector do tipo TH-GEM com características adequadas para metrologia das radiações ionizantes de baixas energias, mais especificamente para feixes padronizados de mamografia, e com isso contribuir para a linha de pesquisa do uso dos detectores do tipo GEM e TH-GEM em aplicações dosimétricas. Para isso foram realizados inicialmente simulações computacionais, utilizando o código MCNP5, para determinação da geometria e dos materiais adequados, a fim de minimizar a influência dos componentes na energia depositada no volume sensível. Deste modo, foi possível determinar o uso de polioximetileno para construção do invólucro, *Mylar* aluminizado para a janela de entrada e a espessura de 6 mm de alumínio para a blindagem da radiação.

Definindo-se a geometria, foram realizadas simulações utilizando os softwares livres Garfield++, Gmsh e Elmer para a determinação do campo elétrico e dos aspectos do transporte de carga e da avalanche de ionizações no gás dentro do detector. Desse modo, verificou-se que o campo elétrico na zona de multiplicação aumenta linearmente com a diferença de potencial aplicada à placa de amplificação e que, ao se aumentar o campo elétrico nesta zona, o fator de multiplicação (ganho absoluto) aumenta exponencialmente.

Nas simulações de ganho foram utilizados os coeficientes Penning (obtidos na literatura) para cada mistura de gás simulada. O maior ganho obtido nas simulações foi para a mistura Ar/CO₂ na concentração 90/10, seguido com uma pequena diferença pela

mistura Ar/CH₄ também na concentração 90/10. A mistura de Ar/CO₂ na concentração 80/20 foi a que apresentou o menor ganho.

O fluxo de gás foi simulado utilizando o *software* Elmer. Dessa forma, foi possível verificar a homogeneidade da renovação do gás por todo o detector do tipo TH-GEM, principalmente nas regiões de deriva e de indução. Além disso, verificou-se que para um fluxo de 6 volumes por hora a pressão se mantém homogênea.

As eficiências de coleção e de extração, que representam a eficiência dos campos elétricos nas zonas de deriva e de indução, respectivamente, também foram obtidas por simulação. Verificou-se que a eficiência de coleção diminui com o aumento do campo elétrico na região de deriva, enquanto a eficiência de extração, por sua vez, diminui com o aumento do campo elétrico na zona de indução.

A construção dos componentes do detector do tipo TH-GEM foi realizada em colaboração com o laboratório LAMFI-USP do IFUSP e resultou em um detector com lados de $(110,00 \pm 0,05)$ mm e aproximadamente $(300,00 \pm 0,10)$ g. As placas de amplificação e coletora foram construídas de placas de circuito impresso e receberam um tratamento químico que criou uma cobertura fina de prata para evitar a oxidação. A placa de amplificação foi perfurada em um padrão hexagonal, com orifícios de $(0,254 \pm 0,021)$ mm de diâmetro e $(0,11 \pm 0,12)$ mm de distância entre eles.

Dessa forma, foi possível iniciar a caracterização experimental com o detector do tipo TH-GEM construído. O teste de caracterização elétrica mostrou o bom funcionamento da placa de amplificação produzida internamente, com um valor de resistência de $(15,3 \pm 0,4)$ G Ω e tensão limite de 1,0 kV, sendo observada uma perda de corrente ao se aplicar diferenças de potenciais a partir de 600 V.

O ganho efetivo, que representa a eficiência do detector do tipo TH-GEM como um todo, foi obtido experimentalmente para as diferenças de potenciais de 200 V, 300 V, 400 V e 450 V. Verificou-se um aumento exponencial no ganho efetivo com o aumento da tensão aplicada à placa de amplificação. O ajuste na corrente obtida para a diferença de potencial de 450 V apresentou um fator aditivo, que pode representar problemas de

isolamento no detector. Durante este teste foi possível verificar a linearidade da resposta com a variação da corrente no tubo de raios X, sendo o menor fator de correlação linear obtido de 0,9980 para a corrente coletada no eletrodo coletor do detector, mostrando uma aproximada linearidade dos dados.

Sugestão para Trabalhos Futuros

Com o protótipo construído, o detector do tipo TH-GEM pode ser submetido aos testes de estabilidade (estabilidade a curto e longo prazos, teste de corrente de fuga e tempo de estabilização) e de caracterização (teste de dependência energética e angular) nos feixes padronizados de mamografia estabelecidos no LCI, seguindo os métodos e os limites recomendados pela norma IEC 61674 [IEC, 1997], publicada em 1997, com o título *Medical electrical equipment – Dosimeters with ionization chambers and/or semi-conductor detectors as used in X-ray diagnosis imaging* (Equipamentos eletrônicos utilizados em Medicina – Dosímetros com câmaras de ionização e/ou detectores semicondutores como os utilizados em diagnóstico por imagem). Além disso, o detector do tipo TH-GEM pode ser calibrado utilizando os sistemas de referência para feixes de mamografia disponíveis no LCI.

Referências Bibliográficas

- ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Ministério da Saúde. Resolução da Diretoria Colegiada Número 330. Brasília, 2019.
- ATTIX, F. H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. Wiley-VCH, 2ª edição, Weinheim, 2004.
- AZA, E.; CIOCCA, M.; MURTAS, F.; PUDDU, S.; PULLIA, M.; SILARI, M. Preliminary results of the Gas Electron Multiplier (GEM) as real-time beam monitor in hadron therapy **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 841, p. 65-71, 2017.
- AZEVEDO, C. D. R.; CORREIA, P. M.; CARRAMATE, L. F. N. D.; SILVA, A. L. M.; VELOSO, J. F. C. A. THGEM gain calculations using Garfield++: Solving discrepancies between simulation and experimental data **Journal of Instrumentation**, v. 11, p. P08018, 2016.
- BADERTSCHER, A.; KNECHT, L.; LAFFRANCHI, M.; LUSSI, D. MARCHIONNI, A. NATTERER, G.; OTIOUGOVA, P.; RESNATI, F.; RUBBIA, A.; VIANI, T. Operation of a double-phase pure argon large electron multiplier time projection chamber: comparison of single and double phase operation. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 617, p. 188-192, 2010.
- BALAU, E. F. S. **Estudo do Funcionamento de GEM's em Detectores de Xénon Líquido** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.
- BIAGI, S. **Magboltz – Transport of Electrons in Gas Mixtures**. Version 11.3 (Last update: nov/2017), CERN (European Organization for Nuclear Research), 1995 <https://magboltz.web.cern.ch/magboltz/>. Acesso em 09/2020
- BOUCLIER, R.; DOMINIK, W.; HOCH, M.; LABBRÉ, J. C.; MILLION, G.; ROPELEWSKI, L.; SAULI, F.; MANZIN, G. **New observation with the Gas Electron Multiplier (GEM)**. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v. 396 (1), p. 50-66, 1997.

- BOONE, J. M.; FEWELL, T. R.; JENNINGS, R. J. Molybdenum, rhodium, and tungsten anode spectral models using interpolating polynomials with application to mammography, **Medical Physics**, v. 24, p. 1-12, 1997.
- BRESKIN, A.; ALON, R.; CORTESI, M.; CHECHIK, R.; MIYAMOTO, J.; DANGENDORF, V.; MAIA, J.; DOS SANTOS, J. M. F. A concise review of TH-GEM detectors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 598, p. 107-111, 2009.
- CHARPAK, G.; ZUPANCIC, C.; BOUCLIER, R.; BRESSANI, T.; FAVIER, J. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 62, p. 262-268, 1968.
- CHECHIK, R.; BRESKIN, A.; SHALEM, C.; MÖRMANN, D. Thick GEM-like hole multipliers: properties and possible applications. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 535, p. 303-308, 2004.
- CINTRA, F. B. **Avaliação da Metodologia de Cálculo de Dose em Microdosimetria com Fontes de Elétrons com o Uso de Código de MCNP5**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2010.
- CNEN, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Resolução CNEN nº 27, de 06 de janeiro de 2005. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília, 2014.
- CORRÊA, E.; VIVOLO, V.; POTIENS, M. P. A. L. Quality control methodology and implementation of X-radiation standards beams, mammography level, following the standard IEC 61267. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 70, n.7, p.1396-1399, 2012.
- CORTESI, M.; ALON, R.; CHECHIK, R.; BRESKIN, A.; VARTSKY, D.; DANGENDORF, V. Investigations of a THGEM-based imaging detector. **Journal of Instrumentation**, v. 2, p. P09002, 2007.
- DARVISH-MOLLA, S; PRESTWICH, W. V.; BYUN, S. H. Development of an advanced two-dimensional microdosimetric detector based on THick Gas Electron Multipliers. **Medical Physics**, v. 45, n. 3, p. 1241-1254, 2018.
- FUJIWARA, T.; TANAKA, S.; MITSUYA, Y.; TAKAHASHI, H.; TAGI, K.; KUSANO, J.; TANABE, E.; YAMAMOTO, M.; MAKAMURA, N.; DOBASHI, K.; TOMITA, H.; UESAKA, M. Development of a scintillating G-GEM detector for a 6-MeV X-band Linac for medical applications. **Journal of Instrumentation**, v. 8, p. C12020, 2013.
- FUJIWARA, T.; MITSUYA, Y.; FUSHIE, T.; MURATA, K.; KAWAMURA, A.; KOISHIKAWA, A.; TOYOKAWA, H.; TAKAHASHI, H. Gas scintillation glass GEM detector for high-resolution X-ray imaging and CT. **Nuclear Instruments and**

- Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 850, p. 7-11, 2017.
- FUJIWARA, T.; MITSUYA, Y.; TAKAHASHI, H. Radiation imaging with glass gas electron multipliers (G-GEMs). **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 878, p. 40-49, 2018.
- GEUZAIN, C.; REMACLE J.F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 79, pp. 1309–1331, 2009.
- GIOMATARIS, Y.; REBOURGEARD, P.; ROBERT, J. P.; CHARPAK, G. MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 376, p. 29-35, 1996.
- GUM, ISO. **Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição**. Tradução Inmetro. 1ª Edição. Rio de Janeiro, 2012.
- HANU, A. R. **Development of a TH-GEM Imaging Detector with Delay Line Readout**. Tese de Doutorado. McMaster University, Hamilton, 2013.
- IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments**. Safaety Report Series 16. Vienna, 2000 (SRS 16).
- IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: International Code of Prattice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water**. Technical Report Series 398. Vienna, 2001. (TRS 398)
- IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice**. Technical Report Series 457. Vienna, 2007 (TRS 457).
- ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITIS AND MEASUREMENTS. **Fundamental Quantities Units for Ionizing Ratiation**, ICRU Report, n. 85, 2011.
- IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Medical Electrical Equipment – Dosimeters with Ionization Chamber and / or Semi-Conductor Detectors as used in X-ray Diagnosis Imaging**. Geneva, 2012 (IEC 61674).
- ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Dose Ratemeters and for Determining their Response as a Function of Photon Energy**. International Standard 4037. Geneva, 2019 (ISO 4037).

- KNOLL, G. **Radiation Detection and Measurement**. John Wiley & Sons, New York, 4.ed, 2010.
- LOS ALAMOS LABORATORY, **MCNP – A General Monte Carlo N-particle Transport Code**. Version 5, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, 2008.
- MOROS, A. V.; SERRATO, H. F. C. Characterization and calibration of a Triple-GEM detector for medical dosimetry. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 1000, p. 165241, 2021.
- MOSLEHI, A.; RAISALI, G. A multi-element thick gas electron multiplier-based microdosemeter for measurement of neutrons dose-equivalent: a Monte Carlo study. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 176, p. 165241, 2017.
- OED, A. Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v.263, p. 351-359, 1988.
- OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das Radiações**. Oficina de Textos, São Paulo, 1.ed, 2010.
- PERIALE, L.; PESKOV, V.; CARLSON, P.; FRANCKE, T. PACLOPOULOS, P.; PICCHI, P. PIETROPALO, F. Detection of the primary scintillation light from dense Ar, Kr and Xe with novel photosensitive gaseous detectors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 478, p. 377-383, 2002.
- RAJU, G. G. **Gaseous Electronics**. Taylor & Francis, 1.ed, London, 2005.
- RAMOS, M. M. O.; TAUHATA, L.; DI PRINZIO, M. A. R. R. **Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (Recomendações e Definições)**. Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes - LNMRI. CNEN-MCT Publicações, Rio de Janeiro, 2011.
- RESNICK, R.; EISBERG, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Editora Campus, São Paulo, 1979.
- RUOKOLAINEN, M.; MALINEN, P.; RABACK, P.; ZWINGER, T.; PURSULA, A.; BYCKLING, M. **Elmer-solver manual**. <http://www.nic.funet.fi/index/elmer/doc/ElmerSolverManual.pdf>, 2018. Acesso em 09/2020.
- ŞAHIN, Ö.; TAPAN, İ.; ÖZMUTLU, E. N.; VEENHOF, R. Penning transfer in argon-based gas mixtures. **Journal of Instrumentation**, v. 5, p. P05002, 2010.
- SAULI, F. Principles of operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber. **Lectures given in the Academic Training Programme of CERN**. Geneva, 1977.

- SAULI, F. GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 386, p. 531-534, 1997.
- SAULI, F. **Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications**. Cambridge University Press, 1.ed, New York, 2014.
- SAULI, F. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 805, p. 2-24, 2016.
- SCHINDLER, H. **Garfield++ Simulation of Tracking Detectors - User Guide**. <https://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/>, 2017. Acesso em 09/2020.
- SERAVALLI, E.; HENDRIKSE, J.; HUIZENGA, J.; KREUGER, R.; SCHIPPERS, J. M.; SIMON, A.; VAN EIJK, C. W. E. First Results of a Scintillating GEM Detector for 2-D Dosimetry in an Alpha Beam. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 54, n. 4, p. 1271-1278, 2007.
- SERAVALLI, E.; BOER, M. R.; GEURINK, F.; HUIZENGA, J.; KREUGER, R.; SCHIPPERS, J. M.; VAN EIJK, C. W. E. 2D dosimetry in a proton beam with a scintillating GEM detector. **Physics in Medicine and Biology** v. 54, p. 3755-3771, 2009.
- SILVA, N. F. **Estabelecimento de um sistema padrão primário para raios X de energias baixas com uma câmara de ionização de ar livre**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- SIPAJ, A. **Simulation, Design and Construction of a Gas Electron Multiplier for Particle Tracking**. Tese de Doutorado, University of Ontario, Institute of Technology, Oshawa, 2012.
- SOUZA, G. G. A. **Sistema de Imagem de Fluorescência de Raios X baseado em Detectores Thick-GEM**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, M. A. R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 10^a revisão. Rio de Janeiro. IRD/CNEN. 2014.
- TESSAROTTO, F. TH-GEM: A fast growing MPGD technology. **Il Nuovo Cimento**, v. 100, n. 93, p. 41-49, 2018.
- TIMMER, J. H.; VAN VUURE, T. L.; BOM, V.; VAN EIJK, C. W.; DE HAAS, J.; SCHIPPERS, J. M. A scintillating GEM for 2D-dosimetry in radiation therapy. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 478, p. 98-103, 2002.

WILLIAMS III, R. G.; GRESH, C. J.; PAGH, R. T. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, **Report PNNL-158870**, Pacific Northwest National Laboratory, Washington, 2006.

YOSHIMURA, E. M. Física das radiações: interação da radiação com a matéria. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, p. 57-67, 2009.

Apêndice A

Desenho técnico do Detector do tipo TH-GEM desenvolvido

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**