

Estudo e desenvolvimento de um detector a gás utilizando dispositivos *Thick-GEM*

Study and development of a gas detector using *Thick-GEM* devices

Sergio A. Inácio*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ - Brasil

P.R.B. Marinho

Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

H.P. Lima Jr

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rua Dr. Xavier Sigaud,
150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ - Brasil

Submetido: 28/09/2018 Aceito: 09/10/2019

Resumo: Os primeiros resultados do estudo realizado em dispositivos THGEM (*Thick-Gas Electron Multiplier*) desenvolvidos no Laboratório do Sistema de Detecção do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas são relatados. Foram desenvolvidos dispositivos THGEM mais finos, de espessura de 0,2 mm, com diferentes diâmetros de furo e distâncias entre furos. Resultados de ganho em função da alta tensão aplicada em detectores duplo-THGEM usando estes dispositivos THGEM, para as misturas gasosas Ar/C₂H₆ (75/25) e Ar/CO₂ (70/30) à pressão atmosférica usando raios-X de 5,9 keV, também são apresentados.

Palavras-chave: Detector a gás, Micropattern (GEM, THGEM, MICROMEGAS), multiplicadores de elétrons (gás).

Abstract: The first results of the study performed with THGEM (*Thick-Gas Electron Multiplier*) devices developed in the Detection System Laboratory of the Brazilian Center for Physic Research are reported. Thinner THGEM devices of thickness 0.2 mm, with different hole diameter and pitch have been developed. Results of gain versus high voltage in double-THGEM detectors using these THGEM devices, for the gas mixtures Ar/C₂H₆(75/25) and Ar/CO₂(70/30) at atmospheric pressure using 5.9 keV X-rays, are also presented.

Keywords: Gaseous detectors, Micropattern (GEM, THGEM, MICROMEGAS), Electron multipliers (gas).

1. INTRODUÇÃO

Há quase 110 anos, em 1908, o primeiro contador proporcional monofilar foi inventado por E. Rutherford e H. Geiger; e 20 anos mais tarde, Geiger e Müller lançaram o contador de alto ganho. Estes podem ser considerados os ancestrais dos modernos detectores a gás e, durante muitas décadas, a única ferramenta para o estudo da radiação ionizante, sendo ainda amplamente usados em aplicações específicas de monitoração de radiação.

Admite-se que o contador proporcional multifilar (*Multiwire Proportional Counter* – MWPC) foi introduzido em 1968 por G. Charpak [1]. Sua razoável resolução espacial e capacidade de contar a taxas mais altas iniciaram uma longa história de detectores sensíveis à posição e fez do MWPC uma das ferramentas experimentais mais usadas em Física de Partículas. Posteriormente, foi lançado em 1988 o contador a gás com micro-pistas (*Microstrips Gas Counter* – MSGC) [2], que substituiu os fios por pistas condutoras de larguras e distâncias micrométricas depositadas sob um substrato de vidro e, portanto, propicia menor tempo de coleta de carga.

A partir daí, uma gama de micro-dispositivos com as mais variadas geometrias foram lançados: o *Micro-dot* em 1995 [3], o *Micro-Mesh-Gaseous Structure*-MICROMEGAS [4] e o *Compteur à Trou*-CAT [5] em 1996.

Dentre os detectores baseados em microdispositivos, o *Gas Electron Multiplier* (GEM) foi o um dos que mais se destacaram nos últimos anos. Idealizado por Sauli em 1997 [6], o GEM consiste, basicamente, de uma folha isolante de aproximadamente 50 μm de espessura (material Kapton) coberta de ambos os lados com uma fina camada metálica perfurada por uma matriz de pequenos furos.

Em 2004, A. Breskin e outros pesquisadores desenvolveram um dispositivo similar de espessura superior, o *Thick Gas Electron Multiplier* (THGEM), configurado como uma extensão geométrica do GEM padrão [7]. O THGEM é robusto, de baixo custo e pode ser facilmente fabricado por meio de técnicas de construção de placas de circuito impresso (PCB). Entre outras variações geométricas do THGEM, pode-se introduzir um aro sem cobertura metálica envolvendo o furo, através da corrosão do metal por um processo de litografia ou por meio de prototipação a laser, a fim de obter detectores com melhor desempenho [8].

A aplicação de um potencial elétrico entre os eletrodos do THGEM cria um campo elétrico de dipolo forte, responsável por uma eficiente focalização de elétrons no interior do canal

*Electronic address: inacio@cbpf.br

do dispositivo. Esse modo de operação, também, viabiliza a multiplicação de elétrons por meio da quebra das moléculas de gás.

Maiores ganhos podem ser obtidos usando múltiplos THGEMs organizados em cascata. Nesta hipótese, os campos elétricos entre THGEMs devem ser otimizados para fornecer a máxima transferência da avalanche eletrônica, minimizando as perdas de elétrons nos eletrodos do THGEM [9].

O presente trabalho apresenta os primeiros resultados do estudo realizado em dispositivos THGEM desenvolvidos no Laboratório do Sistema de Detecção, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (LSD / CBPF). Resultados de ganho e estabilidade de detectores duplo THGEM, com dispositivos THGEM desenvolvidos em diferentes geometrias, e utilizando diferentes misturas gasosas, serão apresentados nesta nota técnica.

2. INSTRUMENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS DE MEDIDAS

2.1. O Thick-GEM

Por meio de técnicas de construção de placa para circuito impresso (PCB), fabricou-se um conjunto de THGEM com 200 μm de espessura, projetado para estudar como o ganho efetivo se comporta sob diferentes geometrias (diâmetros de furo e passo entre eles).

O esquemático com detalhes construtivos dos THGEM construídos está representado na Figura 1. Cada PCB THGEM tem três setores, com diâmetros de furo diferentes: 250, 300, 400 μm , respectivamente. A distância entre os furos também é variável; no primeiro setor, a distância entre os furos é de 500 μm ; no segundo, 700 μm ; e no terceiro, 800 μm , arranjados em uma rede hexagonal. Cada setor apresenta a mesma área ativa de $3 \times 3 \text{ cm}^2$. Esta geometria não possui *Rim* (aro não metalizado, envolvendo o furo) [8], [15].

A elaboração do dispositivo tipo PCB foi realizada por meio de um software específico, o ALTIUM DESIGNER.

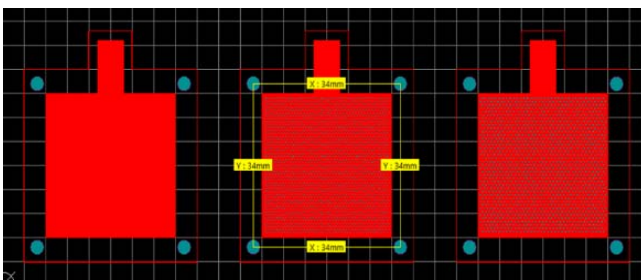


Figure 1: Estrutura esquematizada das três geometrias construídas.

Utilizando um microscópio óptico (Laborana®), Lens PL L 10 / 0.25), foram observadas as imagens geométricas dos novos dispositivos THGEM desenvolvidos no LSD. Na Figura 2 é apresentada a estrutura de um dos THGEM desenvolvidos observado pelo microscópio ótico.

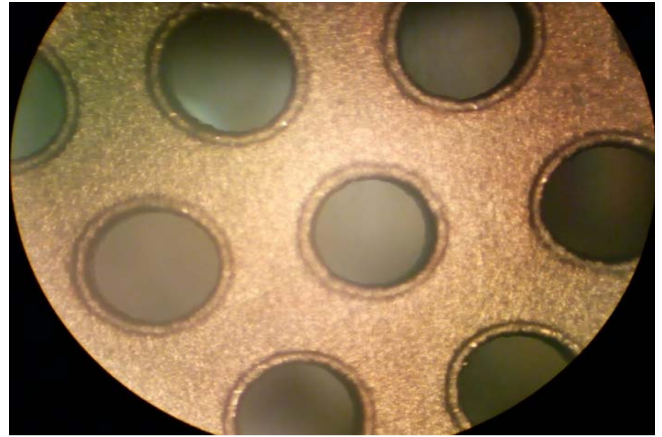


Figure 2: Geometria de um dos dispositivos THGEM desenvolvidos no LSD, observado por microscópio óptico.

Todos os dispositivos construídos foram testados individualmente através da medida de corrente de fuga. Aqueles com o melhor resultado foram escolhidos para prosseguimento do estudo.

O teste de corrente de fuga consiste, basicamente, em avaliar a corrente em função da variação de tensão aplicada a cada face do THGEM. Observando o comportamento da corrente de fuga de cada dispositivo, foi possível selecionar os dispositivos de melhor desempenho, i.e., aqueles que apresentaram uma corrente baixa. A corrente de fuga expressa a resistência de isolamento. A variação da tensão deve provocar uma pequena variação (ou nula) da corrente, devido à resistividade intrínseca do dielétrico utilizado (RF4). A tensão máxima aplicada entre as faces do THGEM foi de $\Delta V = 800 \text{ V}$, sendo observada uma corrente de fuga máxima de aproximadamente 10nA. De acordo com nossa experiência com os dispositivos GEM, consideramos satisfatórios apenas os dispositivos com corrente de fuga menor ou igual 10nA, de forma que podemos assumir que, acima deste patamar, o dispositivo não apresentaria um isolamento adequado das duas faces metálicas do THGEM.

2.2. Detector single – THGEM

A primeira etapa desse projeto resultou na montagem de um detector Single-THGEM. Trata-se de um detector a gás consistindo, basicamente, de um plano catódico e de um plano anódico (malhas de aço com transparência ótica de 81%), com um único THGEM entre eles. Na Figura 3 é apresentado o esquemático da configuração do referido detector, onde é possível observar duas regiões distintas: a região de conversão e arraste, localizada entre o catodo e o eletrodo superior do THGEM, distantes 4,1 mm; e a região de indução, delimitada pelo eletrodo inferior do THGEM e pelo plano anódico distantes 3,1 mm.

O THGEM e as malhas de aço foram instalados em uma base de cloreto de polivinila (PVC) dentro de uma caixa de alumínio, conforme mostrado na Figura 4. Todas as medidas foram realizadas com base em duas misturas gasosas -

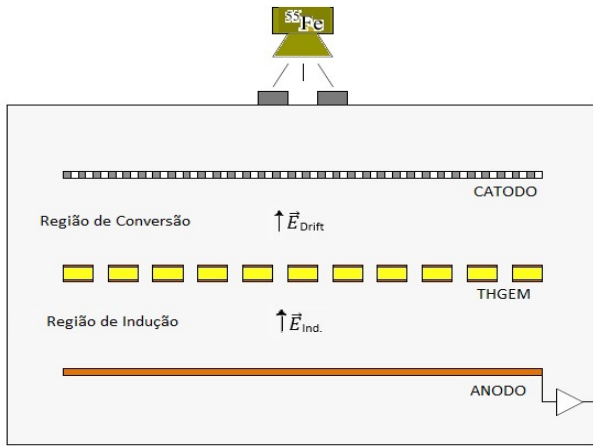


Figure 3: A estrutura de um detector Single-THGEM.

Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25) - e irradiando o detector com fonte de raios X natural ⁵⁵Fe. Todos os eletrodos foram polarizados com fontes de alta tensão modelo CAEN N471A. O sinal do detector foi medido após passar por um pré-amplificador de carga modelo ORTEC 142H (com sensibilidade de cerca de 700 mV/pC).

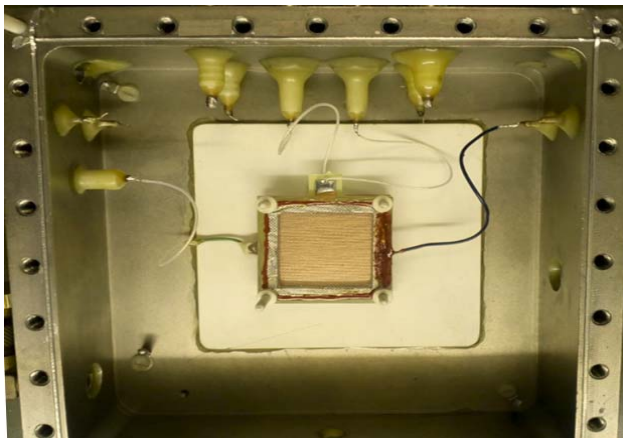


Figure 4: Montagem de um detector Single-THGEM.

Quando iluminado pela fonte de ⁵⁵Fe, os fótons interagem com as moléculas do gás, através do efeito fotoelétrico. A interação de um fóton com o gás gera um número discreto de pares de elétrons e íons. Os elétrons ejetados dos átomos têm energia suficiente para ionizar outros átomos, criando novos pares [10]. O número de cargas primárias pode ser calculado por:

$$n_p = E_\gamma \left(\frac{r_{Ar}}{W_{Ar}} + \frac{r_{CO_2}}{W_{CO_2}} \right) \quad [11]$$

onde n_p é o número de cargas primárias, E 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 no gás, e W_{Ar} e W_{CO_2} são as energias médias para produção de um par de íons para o argônio e o CO₂, respec-

tivamente [10]. Polarizando-se adequadamente os eletrodos, são obtidos campos elétricos que favorecem o arraste, a multiplicação e a coleta dos elétrons gerados pelo efeito fotoelétrico. O princípio de funcionamento é simples, no qual os elétrons ionizados na região de conversão são direcionados para o canal do THGEM, onde, na presença de campos elétricos elevados (>50kV/cm), são multiplicados. No interior do canal do dispositivo, o processo de avalanche eletrônica se inicia.

O livre caminho médio α^{-1} é delimitado pela distância entre duas colisões sucessivas. Desta colisão derivam dois elétrons, que originam mais duas ionizações depois de transitar α^{-1} , produzindo uma reação em cadeia. Em uma dada posição, o número total de elétrons é n e, depois de uma distância dx percorrida, o número de elétrons será equivalente a $dn = n\alpha dx$. Integrando-se esta equação, tem-se $G = n/n_0 = e^{\alpha x}$, onde G é o fator de multiplicação [11]. Em um dado instante, todos os elétrons estão situados na frente de uma distribuição de cargas, com uma cauda de íons positivos deixados para trás, diminuindo em número e extensão lateral [10]. A figura 5 mostra a imagem de uma avalanche em forma de gota no interior do canal do dispositivo.

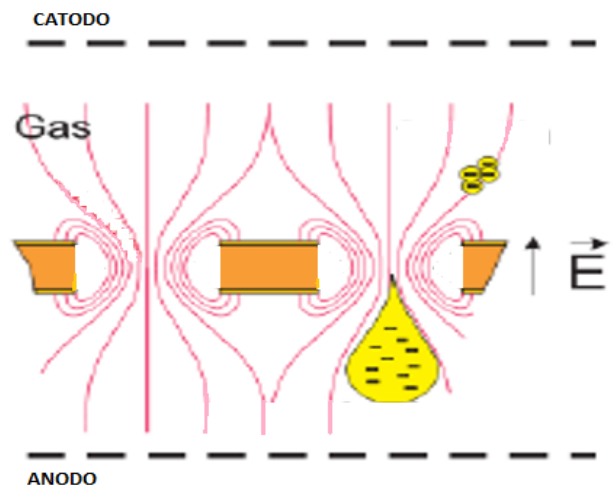


Figure 5: Imagem de uma avalanche em forma de gota.

A nuvem eletrônica produzida, é ejetada para a região de indução, onde os elétrons são coletados [12].

2.3. Detector Duplo – THGEM

A Figura 6 mostra a estrutura de um detector Duplo-THGEM.

Uma das características principais dos detectores que utilizam os dispositivos THGEM (ou GEM) é a possibilidade de arranjos em cascata (um sobre o outro), como pode ser observado na Figura 6. O paralelo comparativo entre os dois detectores descritos permite constatar o surgimento de uma nova região, chamada de região de transferência, entre os dispositivos THGEMs no modelo duplo. Seguindo o mesmo raciocínio da seção 2.2, quando irradiado por uma fonte de

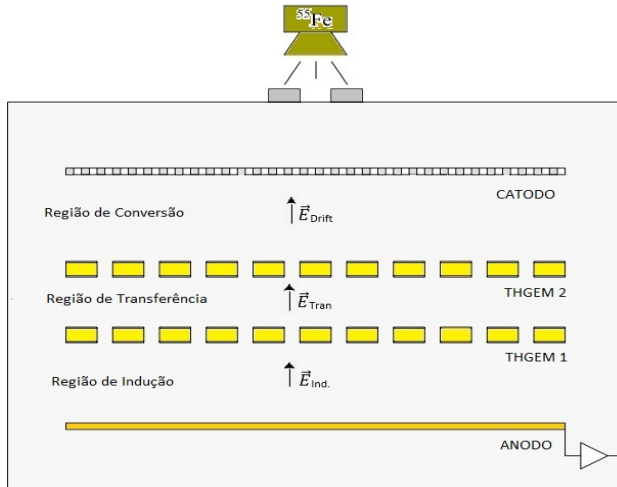


Figure 6: Estrutura de um detector Duplo-THGEM.

raios X (^{55}Fe), o gás do detector duplo-THGEM é ionizado. Os elétrons ionizados na região de conversão são direcionados para o primeiro THGEM, onde são multiplicados, sendo transferidos em seguida para a região de transferência. Nessa região, a avalanche eletrônica é coletada e arrastada para o segundo THGEM.

No segundo THGEM, a avalanche eletrônica é novamente multiplicada, convergindo para a região de indução, onde o ânodo coleta os elétrons [13]. O ânodo foi colocado a uma distância de 3,1 mm do último THGEM. As distâncias entre as regiões de conversão e de transferência foram mantidas em 4,1 e 2,0 mm, respectivamente. A janela do detector é feita de uma folha de fibra de carbono com 300 μm de espessura. Cada eletrodo foi polarizado de forma independente, por meio de fontes CAEN N471A; a leitura dos sinais induzidos pelo anodo foi realizada por meio de um circuito de desacoplamento com um amplificador de carga (Ortec 142H, sensibilidade = 700 mV / pC). Os eletrodos foram polarizados de modo a obter o levantamento das curvas de ganho do detector operando à pressão atmosférica (fluxo contínuo) com as misturas gasosas Ar/C₂H₆ (75/25) e Ar/CO₂ (70/30), utilizando-se fonte de ^{55}Fe com emissão de raios-X de energia 5,9 keV. A Figura 7 mostra o sinal anódico proveniente do detector duplo-GEM observado em um osciloscópio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos Detectores THGEM

3.1.1. Estudo do Ganho

Primeiramente, foi realizada a caracterização do detector single-GEM, através do levantamento de sua curva de ganho efetivo. O ganho efetivo de um detector THGEM é dado pela leitura dos elétrons capturados no anodo, originados a partir de cada elétron primário gerado na região de conversão [9], [14].

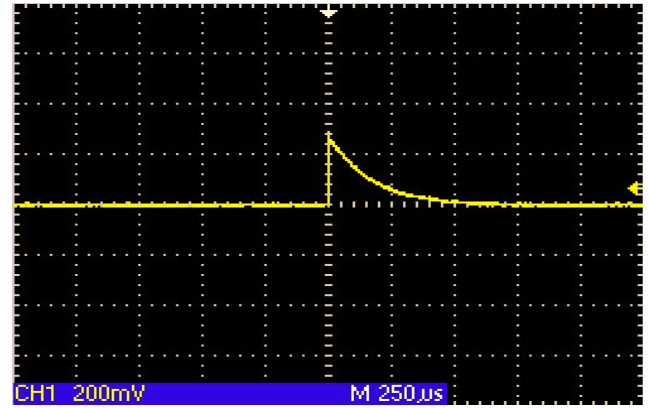


Figure 7: Sinal anódico do Detector Duplo-THGEM observado por osciloscópio.

A caracterização foi realizada para três geometrias propostas nesse trabalho – como mostra a Tabela 1.

Espessura do THGEM (mm)	Diâmetro de furo (mm)	Passo entre furos (mm)	Borda sem cobre (mm)
0,2	0,2	0,5	0
0,2	0,3	0,7	0
0,2	0,4	0,8	0

Tabela 1. Dimensões dos dispositivos THGEM desenvolvidos no LSD.

A primeira geometria, denominada geometria THGEM P, é a geometria com as menores dimensões de espessura, diâmetro de furo e de passo entre os furos - como mostra a Tabela 1. A geometria THGEM M apresenta dimensões medianas, enquanto a geometria THGEM G perfaz as maiores dimensões. Há quatro exemplares representativos de cada tipo de geometria, denominados, para fins do presente trabalho, 1P, 2P, 3P, 4P; 1M, 2M, 3M, 4M, 1G, 2G, 3G, 4G. Apenas os exemplares 1P, 2P, 4P, 2M, 4M apresentaram resultados satisfatórios, conforme mostrado na Figura 8.

A Figura 8 mostra a curva de ganho do Single-THGEM para cada um dos dispositivos. São mostrados somente os resultados representativos, relativos às geometrias THGEM P e THGEM M. Todo o procedimento de levantamento da curva de ganho foi conduzido para a mistura gasosa de Ar/CO₂ (70/30).

Embora a quantidade de carga gerada num detector single-THGEM seja pequena, foi possível, através das curvas de ganho e da observância das descargas elétricas ocorridas durante as medidas, verificar o desempenho dos dispositivos testados. Isto permitiu selecionar os exemplares com melhor desempenho, i.e., os dispositivos THGEM com menor número de descargas durante as medidas, para montagem do detector duplo-GEM, quais sejam: dois dispositivos da geometria P (THGEM 2P e THGEM 4P) e dois exemplares da geometria M (THGEM 2M e o THGEM 4M).

Utilizando os dispositivos supracitados, foi realizada a montagem de um detector duplo-THGEM. O desempenho do

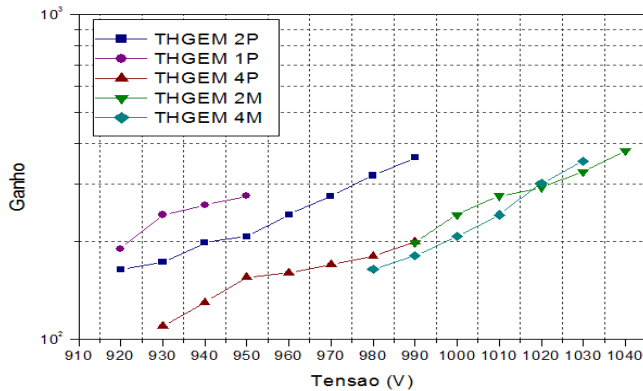


Figure 8: Curvas de ganho do detector single-THGEM para cada um dos dispositivos estudados.

referido detector foi estudado por meio da obtenção das curvas de ganho, utilizando as misturas gasosas Ar/CO_2 (70/30) e $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ (75/25) à pressão atmosférica, como apresentado na Figura 9.

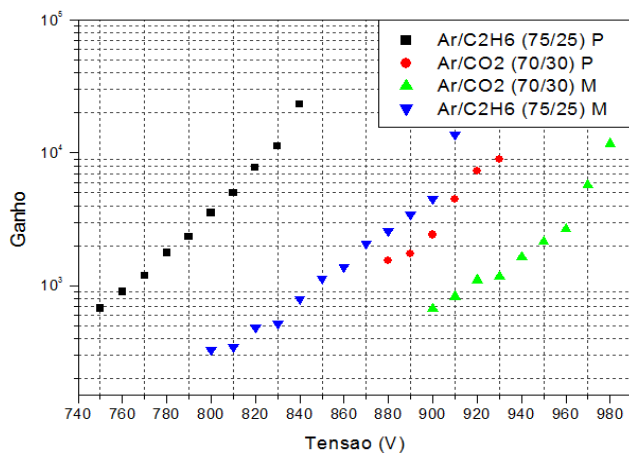


Figure 9: Curva de ganho do detector duplo-THGEM utilizando dispositivos com diferentes geometrias.

Quando se compara os resultados obtidos para o ganho entre detectores single e duplo THGEM (ver Figuras 8 e 9), observamos um incremento no ganho. Isto é esperado, pois a adição de um segundo dispositivo THGEM gera um segundo estágio de multiplicação gasosa, aumentando o número de elétrons capturados no anodo. Pode-se observar, ainda na Figura 9, que os ganhos máximos obtidos para as geometrias P e M são da ordem de 10^4 , para ambas misturas gasosas.

Quando se compara as curvas de ganho do detector duplo-THGEM, utilizando a mistura gasosa $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ (75/25), observa-se que o ganho de 10^4 é alcançado com tensões de operação de aproximadamente $\Delta V = 830$ V e $\Delta V = 910$ V com o detector utilizando os dispositivos P e M, respectivamente. Portanto, o detector que utilizou o dispositivo THGEM com menor diâmetro de furo atinge ganhos mais elevados com tensões de polarização mais baixas.

Pode ser observado ainda que, ao se comparar as curvas de

ganho do detector duplo-THGEM utilizando o mesmo dispositivo (P ou M), mas operando com as misturas gasosas diferentes, o ganho de 10^4 é atingido com tensões de operação menores para a mistura gasosa $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ (75/25). Isto se deve ao comportamento da seção de choque molecular com o aumento da energia dos elétrons, variável de acordo com o gás [13]. Alguns gases mantêm os elétrons à baixa energia mesmo quando submetidos a valores de campo elétrico mais altos, como por exemplo o dióxido de carbono (CO_2), chamado de gás 'frio'. Enquanto isso, outros gases, como o argônio (Ar), mesmo sob um campo elétrico de baixa magnitude, provocam aumento considerável da energia eletrônica [14]. Como consequência, as propriedades de velocidade de arraste, e de coeficiente de difusão dos elétrons em gases, podem ser muito diferentes. A adição de pequenas frações de um gás a outro pode alterar substancialmente as propriedades de arraste de elétrons, interferindo consideravelmente no ganho do detector [15].

Face ao exposto acima, percebe-se que os parâmetros geométricos construtivos dos dispositivos THGEM, bem como a mistura gasosa utilizada, influenciam diretamente o desempenho do detector. Assim, tanto a escolha da mistura gasosa apropriada, quanto da geometria adequada do dispositivo THGEM, podem otimizar o funcionamento do detector de forma a obter ganhos mais elevados com tensões de polarização mais baixas, limitando a ocorrência de descargas elétricas no detector.

Outros parâmetros geométricos que podem ser otimizados na busca do melhor desempenho de um detector tipo THGEM são as dimensões escolhidas para as regiões de transferência e indução, bem como os campos elétricos aplicados nas mesmas. Assim, um conjunto de medidas foi realizado para estudar e otimizar o ganho e a estabilidade do detector THGEM. Foram utilizados os dispositivos com geometrias P e M buscando, principalmente, operar o detector com tensões de polarização menores para minimizar a probabilidade de descarga. Isto porque quanto menor a tensão aplicada, maior a possibilidade de operação estável do detector, pois tensões mais elevadas provocam instabilidade dos dispositivos THGEM [16].

3.1.2. Estudo do Transporte de Elétron no dispositivo THGEM tipo P

Um detector duplo-THGEM foi montado com os dispositivos THGEM com geometria P, conforme mostrado na Figura 10. Os parâmetros geométricos e de campo elétrico utilizados foram:

- distância e campo de conversão: 4,1 mm e 1,5 kV/cm;
- distância e campo de transferência: 2,0 mm e 2kV/cm;
- distância e campo de indução: 3,1 mm e 3 kV/cm.

Primeiramente, foi feito o levantamento do ganho do detector iluminado por uma fonte ^{55}Fe , através dos sinais observados na parte superior (*top*) do segundo dispositivo THGEM e do anodo, utilizando as misturas gasosas Ar/CO_2 (70/30) e $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ (75/25). Os resultados são apresentados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 11 e 12 que o ganho no anodo é menor que o ganho no top do segundo THGEM. Verifica-se que o ganho médio no top do segundo THGEM é cerca

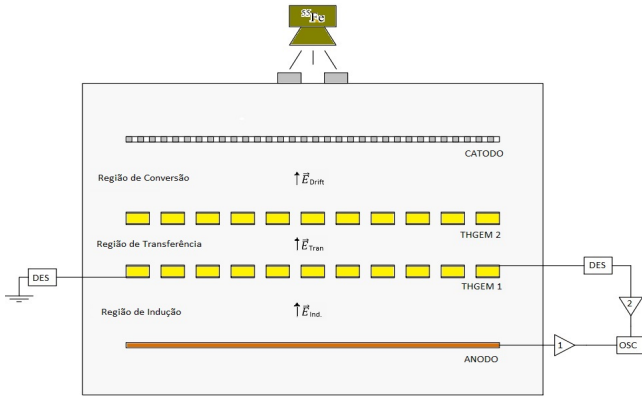


Figure 10: Montagem experimental para estudo da variação do ganho do detector através do sinal do anodo e do sinal do top no segundo THGEM.

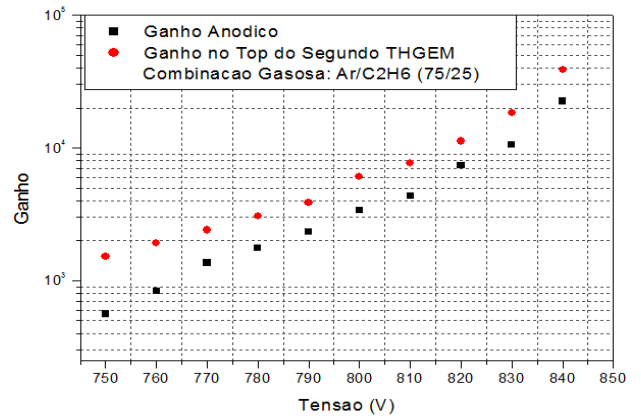


Figure 12: Comparação entre os ganhos no top do segundo THGEM tipo P e no anodo, utilizando a mistura gasosa Ar/C₂H₆ (75/25).

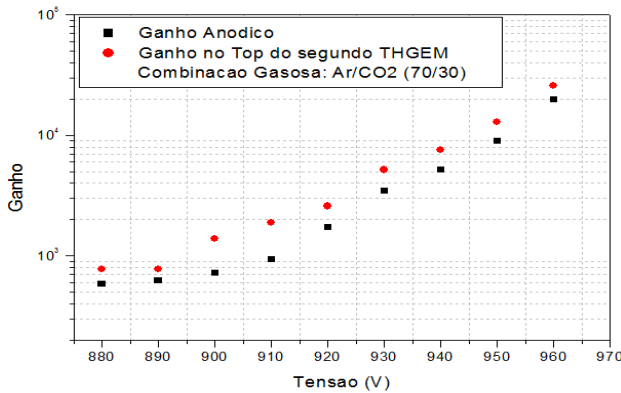


Figure 11: Comparação entre os ganhos no top do segundo THGEM tipo P e no anodo, utilizando a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30).

de 40% maior que o ganho médio no anodo com a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30). O mesmo comportamento é observado utilizando a mistura gasosa Ar/C₂H₆ (75/25): o ganho no top do segundo THGEM é cerca de 34, ou seja, 10% maior que o ganho no anodo. Este comportamento indica que ocorre perda de elétrons no dispositivo THGEM durante o processo de multiplicação gasosa e transferência dos elétrons através dos furos do dispositivo para a região de indução. Este comportamento pode estar relacionado às imperfeições causadas pelo método construtivo dos dispositivos THGEM, uma vez que técnicas de confecção de placas de circuito impresso (PCB) podem deixar pontas ou saliências nas proximidades, ou mesmo no interior dos furos do dispositivo THGEM. Como o diâmetro dos furos são da ordem de 250 a 300 μm, tais imperfeições podem levar à distorções do campo elétrico, prejudicando a multiplicação gasosa e a transferência dos elétrons gerados para região de indução.

Uma maneira de minimizar os possíveis efeitos das imperfeições supracitadas é otimizar os campos de transferência e de indução. Para tanto, a variação dos campos de transferência e de indução aplicados foi estudada, para ob-

servar se haveria ou não incremento do número de elétrons coletados no anodo.

Primeiramente, estudou-se o comportamento das curvas de ganho do detector duplo-THGEM, aplicando os seguintes valores para campo de transferência: 1,5, 2,0 e 2,5 kV/cm, mantendo-se inalterados os campos elétricos da demais regiões.

Nas Figura 13 e 14 são apresentados os resultados dos coeficientes angulares das curvas de ganho obtidas em função do campo de transferência aplicado, para o detector duplo-THGEM operando com as misturas gasosas Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25), respectivamente.

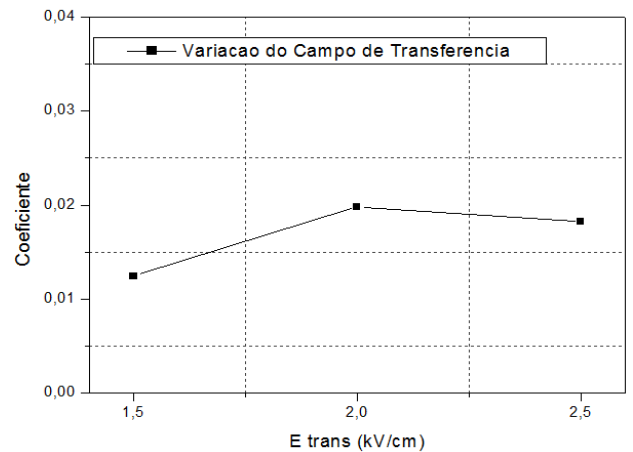


Figure 13: Variação do coeficiente angular das curvas de ganho em função do campo de transferência, utilizando a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30).

O coeficiente angular representa a variação do ganho do detector em função da diferença de potencial nos eletrodos do dispositivo THGEM. Nas Figura 13 e 14 é observado que não há variação significativa do coeficiente angular em função do campo de transferência para ambas as misturas gasosas estudadas. Para a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30),

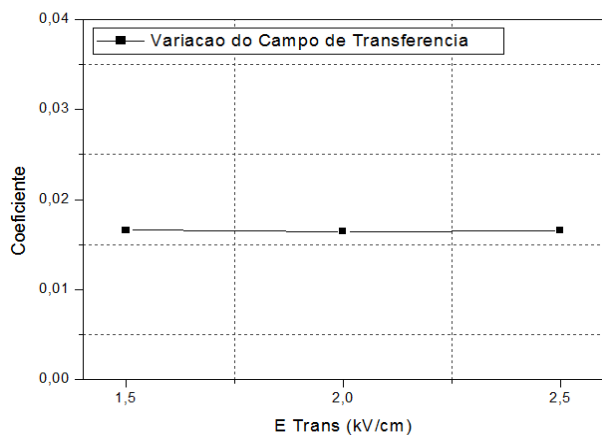


Figure 14: Variação do coeficiente angular das curvas de ganho em função do campo de transferência, utilizando a mistura gasosa Ar/C_2H_6 (75/25).

uma variação um pouco mais acentuada é observada quando se compara o coeficiente angular (0,01245/V) obtido em um campo de transferência de 1,5 kV/cm, com o coeficiente angular (0,01979/V) obtido em um campo de transferência de 2 kV/cm. Portanto, foi verificado que não houve influência significativa da variação do campo de transferência no ganho do detector. Conseqüentemente, não houve influência significativa no número total de elétrons coletados no anodo que caracterizasse uma diminuição na perda de elétrons nas proximidades dos furos dos dispositivos THGEM.

Posteriormente, estudou-se o comportamento das curvas de ganho do detector duplo-THGEM, aplicando os seguintes valores para campo de indução: 2,5, 3, 3,5 e 4 kV/cm, mantendo-se inalterados os campos elétricos da demais regiões.

Nas Figura 15 e 16 são apresentados os resultados dos coeficientes angulares das curvas de ganho obtidas em função do campo de indução aplicado, para o detector duplo-THGEM, operando com as misturas gasosas Ar/CO_2 (70/30) e Ar/C_2H_6 (75/25), respectivamente.

Nas Figuras 15 e 16, também é observado que não há uma variação significativa do coeficiente angular em função do campo de indução para ambas as misturas gasosas estudadas. Para a mistura gasosa Ar/CO_2 (70/30), uma variação um pouco mais acentuada é observada quando se compara o coeficiente angular (0,01636/V) obtido em um campo de indução de 2,5 kV/cm, com o coeficiente angular (0,01979/V) obtido em um campo de indução de 3 kV/cm. Portanto, foi verificado que não houve influência significativa da variação do campo de indução no ganho do detector. Conseqüentemente, não houve influência significativa no número total de elétrons coletados no anodo que caracterizasse uma diminuição na perda de elétrons nas proximidades dos furos dos dispositivos THGEM.

Face ao exposto acima, conclui-se que a variação dos campos de transferência e indução, dentro dos valores propostos, não influenciaram significativamente a perda de elétrons nas proximidades do furo do THGEM tipo P, com o detector duplo-THGEM operando com as misturas gasosas

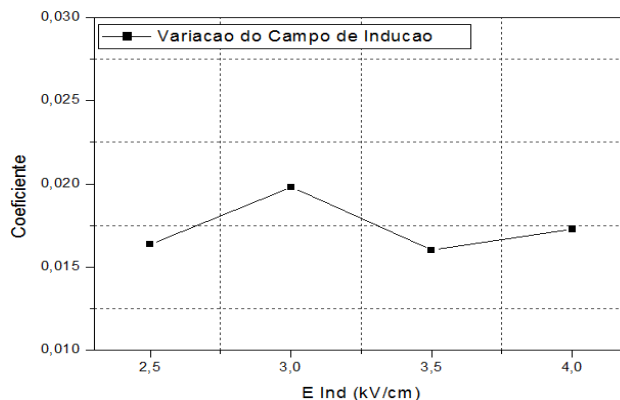


Figure 15: Variação do coeficiente angular de cada curva de ganho em função da variação do campo de indução, utilizando a mistura gasosa Ar/CO_2 (70/30).

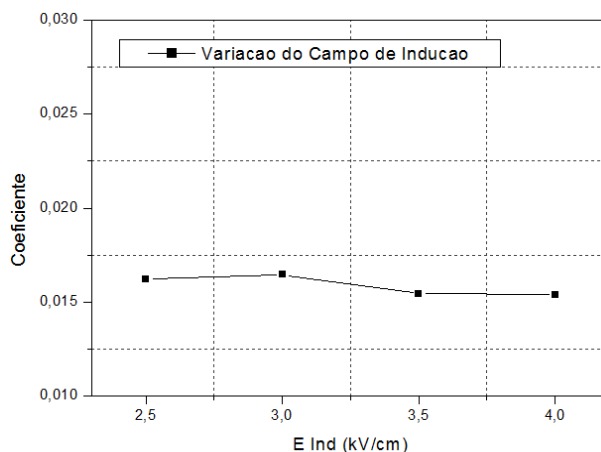


Figure 16: Variação do coeficiente angular de cada curva de ganho em função da variação do campo de indução, utilizando a mistura gasosa Ar/C_2H_6 (75/25).

Ar/CO_2 (70/30) e Ar/C_2H_6 (75/25), respectivamente. Assim, a perda de elétrons deve estar, provavelmente, relacionada aos defeitos construtivos dos dispositivos THGEM anteriormente mencionados.

Por outro lado, os resultados obtidos permitiram otimizar os campos de transferência e indução, uma vez que se verificou não haver necessidade de elevar os valores desses campos para se obter ganhos mais elevados. Conseqüentemente, o detector pode ser polarizado com tensões mais adequadas e operar de forma mais estável, com reduzido número de descargas elétricas.

3.1.3. Estudo da Estabilidade do THGEM tipo P

A fim de observar o comportamento do detector duplo-THGEM, operando com as misturas gasosas Ar/CO_2 (70/30) e Ar/C_2H_6 (75/25) a pressão atmosférica e com os campos de transferência e indução otimizados, foram realizadas me-

didadas de estabilidade do ganho ao longo do tempo. Nas Figuras 17 e 18, são apresentados os resultados do comportamento do ganho do detector durante período de oito horas, quando iluminado por uma fonte de ^{55}Fe .



Figure 17: Figura 17. Variação do ganho usando um pré-amplificador de carga, durante oito horas, para a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30).

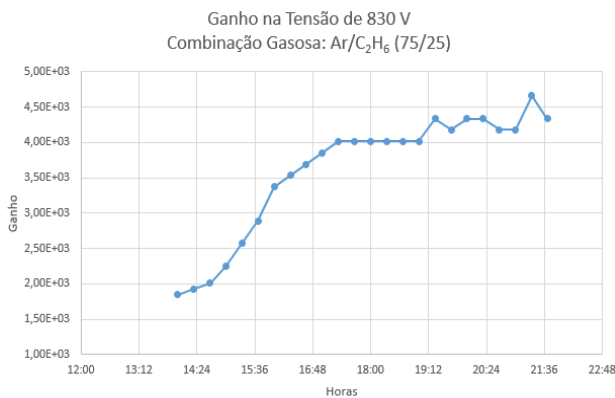


Figure 18: Variação do ganho usando um pré-amplificador de carga, durante oito horas, para a mistura gasosa Ar/C₂H₆ (75/25).

Baseando-se nos estudos apresentados anteriormente, foram estabelecidas as diferenças de potencial aplicadas aos dispositivos THGEM de $\Delta V = 930 \text{ V}$ e $\Delta V = 830 \text{ V}$, para as misturas gasosas Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25), respectivamente.

Na Figura 17, foi observado que, aproximadamente, entre 9h40 e 12h00 ocorreu uma pequena variação no ganho do detector (entre $4,83 \times 10^3$ e $5,35 \times 10^3$). A partir de 12h, o ganho do detector teve um comportamento variável, até atingir um patamar de equilíbrio às 13h20, o que durou até o final da medida às 17h40 (ganho entre $8,63 \times 10^3$ e $9,67 \times 10^3$). Assim, pode-se concluir que detector levou aproximadamente 4 horas para entrar numa região de estabilidade de operação.

Na Figura 18, foi observado que, aproximadamente, de 13h20 às 17h00, o ganho do detector teve um comportamento variável, até atingir um patamar de equilíbrio que

durou até o final da medida às 21:40 (ganho entre $8,63 \times 10^3$ e $9,67 \times 10^3$). Assim, pode-se concluir que detector também levou aproximadamente 4 horas para entrar numa região de estabilidade de operação.

3.1.4. Estudo do Transporte de Elétrons no dispositivo THGEM tipo M

Considerando as mesmas premissas da seção 3.1.2 acima, um detector duplo-THGEM foi montado com os dispositivos de geometria M, para fins de comparação dos resultados obtidos com os dispositivos THGEM tipo P.

Os resultados das curvas de ganho do detector, iluminado por uma fonte ^{55}Fe , obtidos através dos sinais observados no top do segundo dispositivo THGEM e do anodo, utilizando as misturas gasosas Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25) são apresentados nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

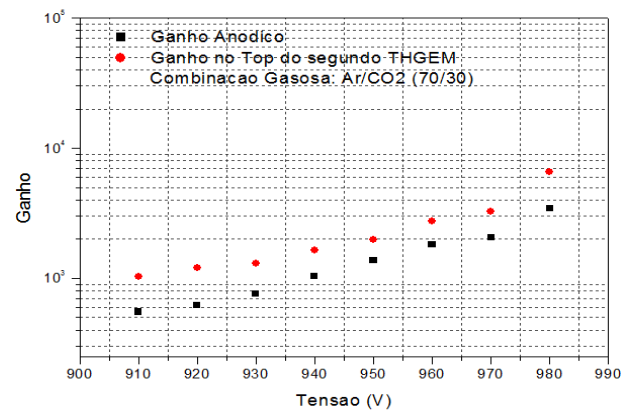


Figure 19: Comparação entre os ganhos no top do segundo THGEM tipo M e no anodo, utilizando a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30).

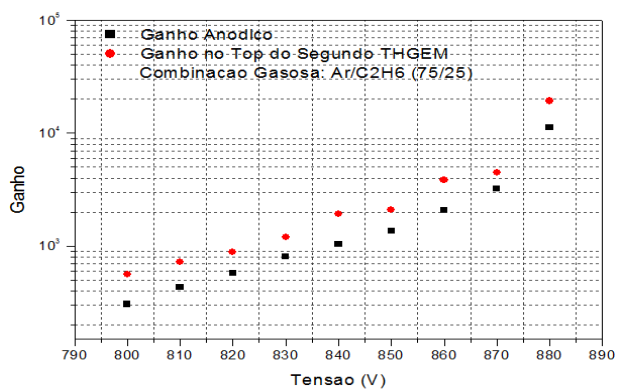


Figure 20: Comparação entre os ganhos no top do segundo THGEM tipo M e no anodo, utilizando a mistura gasosa Ar/C₂H₆ (75/25).

Observa-se nas Figuras 19 e 20 que o ganho no anodo é menor que o ganho no top do segundo THGEM, ou seja, o mesmo comportamento observado para o detector utilizando os dispositivos THGEM tipo P. Conforme já discutido na

seção 3.1.2, esse comportamento indica que ocorre perda de elétrons no dispositivo THGEM durante o processo de multiplicação gasosa e transferência dos elétrons através dos furos do dispositivo para a região de indução. E que isto está relacionado às imperfeições causadas pelo método construtivo dos dispositivos THGEM. Assim, não houve necessidade de realizar novamente estudo de variação dos campos de transferência e de indução aplicados, assumindo-se que o resultado seria o mesmo.

Não obstante, verifica-se que o ganho médio no top do segundo THGEM é cerca de 70% maior que o ganho médio no anodo com a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30). O mesmo comportamento é observado utilizando a mistura gasosa Ar/C₂H₆ (75/25): o ganho no top do segundo THGEM cerca de 67% maior que o ganho no ânodo. Portanto, percebemos que a perda de elétrons gerados no segundo THGEM é maior naqueles de geometria tipo M.

3.1.5. Estudo da Estabilidade do THGEM tipo M

De forma análoga, foram realizadas medidas de estabilidade do ganho ao longo do tempo do detector com dispositivos THGEM tipo M, operando com as misturas gasosas Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25) na pressão atmosférica e com os campos de transferência e indução otimizados. Nas Figuras 21 e 22 são apresentados os resultados do comportamento do ganho do detector durante um período de oito horas, quando iluminado por fonte de ⁵⁵Fe.

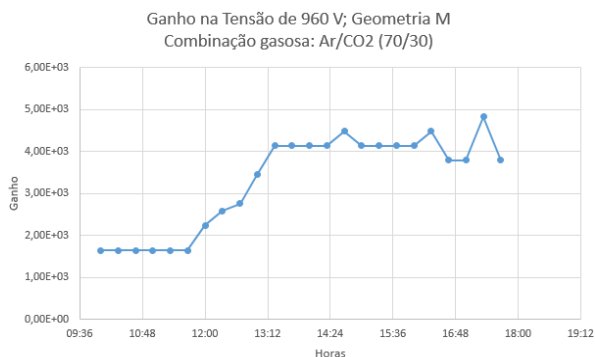


Figure 21: Variação do ganho usando um pré-amplificador de carga, durante oito horas, para a mistura gasosa Ar/CO₂ (70/30).

Baseando-se nos estudos apresentados anteriormente, foram estabelecidas as diferenças de potencial aplicadas aos dispositivos THGEM de $\Delta V = 960$ V e $\Delta V = 860$ V, para as misturas gasosas Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25), respectivamente.

Na Figura 21 foi observado que, aproximadamente, entre 10h00 e 11h40 o ganho do detector ficou estável em $1,64 \times 10^3$. A partir de 12h00, o ganho do detector apresentou comportamento variável até atingir um patamar de equilíbrio às 13h20, o que durou até o final da medida às 17h40 (ganho entre $4,14 \times 10^3$ a $3,80 \times 10^3$). Assim, pode-se concluir que detector levou aproximadamente 3 horas para entrar numa região de estabilidade de operação.

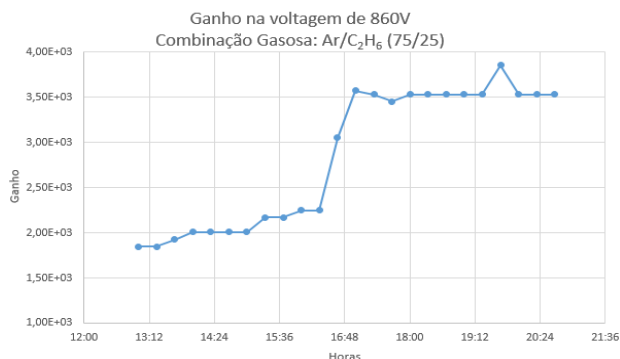


Figure 22: Variação do ganho usando um pré-amplificador de carga, durante oito horas, para a mistura gasosa Ar/C₂H₆ (75/25).

Na Figura 22 foi observado que, de 13h00 às 17h00, o ganho do detector teve um comportamento variável até atingir um patamar de equilíbrio que durou até o final da medida às 20h30 (ganho da ordem de $3,5 \times 10^3$). Logo, pode-se concluir que o detector levou aproximadamente 4 horas para entrar numa região operação estável.

4. CONCLUSÃO

Um estudo de detectores multi-THGEM utilizando dispositivos THGEM desenvolvidos no LSD/CBPF foi apresentado. Os dispositivos THGEM possuem área ativa de de 3×3 cm² e 0,2 mm de espessura. Três diferentes geometrias foram testadas através do estudo dos sinais dos detectores utilizando os dispositivos THGEM, operando com as misturas gasosas Ar/CO₂(70/30) e Ar/C₂H₆(75/25) a pressão atmosférica (fluxo contínuo) e iluminado por fonte de ⁵⁵Fe (raios-X de 5,9 keV).

Os dispositivos THGEM que apresentaram melhor resultado no levantamento das curvas de ganho para o detector single-THGEM foram selecionados para montagem do detector duplo-THGEM e para os demais estudos realizados. Foram escolhidos os THGEM com geometria tipo P e tipo M.

O estudo comparativo entre as curvas de ganho obtidas através dos sinais observado no anodo e no top do segundo THGEM, permitiu constatar que, tanto para os THGEM tipo P quanto para os THGEM tipo M, ocorre perda de elétrons no dispositivo durante o processo de multiplicação gasosa e transferência dos elétrons através dos furos para a região de indução. Este comportamento foi observado com o detector operando com ambas as misturas gasosas.

Foi estudada também a variação dos campos de transferência e de indução aplicados para observar se haveria alteração no incremento do número de elétrons coletados no anodo. No entanto, concluiu-se que a variação dos campos de transferência e indução, dentro dos valores propostos, não influenciaram significativamente a perda de elétrons nas proximidades do furo do THGEM tipo P, com o detector duplo-THGEM operando com as misturas gasosas

Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25), respectivamente.

Assim, a perda de elétrons deve estar relacionada às imperfeições causadas pelo método construtivo dos dispositivos THGEM, uma vez que as técnicas tradicionais de confecção de placas de circuito impresso (PCB) podem deixar pontas ou saliências nas proximidades, ou mesmo no interior, dos furos do dispositivo THGEM. Como o diâmetro dos furos são da ordem de 200 a 300 μm, tais imperfeições podem levar à distorções do campo elétrico, prejudicando a multiplicação gasosa e a transferência dos elétrons gerados para a região de indução.

Foram realizadas medidas de estabilidade do ganho ao longo de oito horas a fim de observar o comportamento do detector duplo-THGEM com os dispositivos tipo P e M, operando com as misturas gasosas Ar/CO₂ (70/30) e Ar/C₂H₆ (75/25) a pressão atmosférica e com os campos de transferência e indução otimizados. Deste estudo de estabilidade concluiu-se que o detector atinge uma região de operação estável após aproximadamente 4h de operação contínua.

Finalmente, tomando por base todos os estudos apresentados, constatou-se que os dispositivos THGEM desenvolvidos no LSD/CBPF funcionaram de forma satisfatória. Entretanto, modificações geométricas devem ser introduzidas para minimizar a perda de elétrons observada no segundo THGEM do detector. Uma possível modificação geométrica, que será futuramente implementada, consiste na introdução de um pequeno aro sem cobertura metálica envolvendo cada furo do THGEM, para proporcionar menor ocorrência de descargas elétricas e minimizar as distorções causadas no campo elétrico no interior do furo. Além disso, confeccionar os dispositivos THGEM utilizando o método de prototipação a laser é outra possibilidade que deve evitar os possíveis defeitos causados pelas técnicas tradicionais de confecção de placas de circuito impresso (PCB).

Bibliography

- [1] CHARPAK, G. *et al.*, “The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles”, *Nucl. Instr. and Meth.* **62** (1968) 262.
- [2] A. Oed, *Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases*, *Nucl. Instrum. and Meth. A* **263** (1988) 351.
- [3] .F. Biagi, T.J. Jones, *The microdot gas avalanche chamber: an investigation of new geometries*, *Nucl. Instrum. and Meth. A* **361** (1995) 72.
- [4] Y. Giomataris *et al.*, *MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments*, *Nucl. Instrum. and Meth. A* **376** (1996) 29.
- [5] F. Bartol *et al.*, *The CAT pixel proportional gas counter detector*, *Journal de Physique III* **6** (1996) 337.
- [6] F. Sauli, *GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **386** (1997) 531.
- [7] C. Shalem, R. Chechik, A. Breskin and K. Michaeli, *Advances in Thick GEM-like gaseous electron multipliers — Part I: atmospheric pressure operation*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **558** (2006) 475.
- [8] M. Alexeev, R. Birsa, *et al.*, *Progress toward a THGEM-based detector of single photons*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **639** (2011) 130 - 133.
- [9] P.R.B. Marinho, G.P. Guedes, A.F. Barbosa, P.C.M.A. Farias, *Effects of the electric field on the electron drift velocity in a double-GEM detector in different gas mixtures*, *Radiation Measurements* **39** (2005) 515.
- [10] F. Sauli, *Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers*. CERN **77** – 09 (1977).
- [11] E. de Sales, *Desenvolvimento de detectores a gás multifilares para raios – X*, *Dissertação de Mestrado*, USP. São Paulo.
- [12] A. Breskin, R. Alon, M. Cortesi, R. Chechik, J. Miyamoto, V. Dangendorf, J.M. Maia, J.M.F. Dos Santos, *A concise review on THGEM detectors*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **598** (2009) 107 – 111.
- [13] Rickert, E. *Development and simulation of an active target detector with GEM foil readout*, *Thesis to reach a degree of Master of Science – Lund University*. Sweden.
- [14] P.R.B. Marinho, *Desenvolvimento de detectores Sensíveis à posição Multifilares e Multi-GEM para Obtenção de Imagens de Raios-X*, *Tese de Doutorado*, CBPF. Rio de Janeiro.
- [15] F. Sauli, *Gaseous Radiation Detectors Fundamentals and Applications*, *Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology*, **36** (2014).
- [16] H.B. Liu, Q. Liu, S. Chen, X.D. Ruan, C. Nicholson, Y.G. Xie, Y.H. Zheng, Z.P. Zheng, J.G. Lu, L. Zhou, A.S. Tang, Y.D. Yang, Y. Dong and M. Li, *A study of thinner-THGEM, with some applications*