



## Notas Técnicas

CBPF-NT-003/21

novembro 2021

Estudo de um detector a gás do tipo triplo-GEM usando técnica de localização espacial por linhas de retardo e eletrodo X&Y.

Sergio A. Inácio, H.P. Lima Jr e P.R.B. Marinho

## Estudo de um detector a gás do tipo triplo-GEM usando técnica de localização espacial por linhas de retardo e eletrodo X&Y.

Study of a triple-GEM gas detector using the delay-line technique for spatial localization and X&Y electrode

Sergio A. Inácio e H.P. Lima Jr

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

Submetido: 04/02/2021

Aceito: 18/11/2021

### Resumo:

Os resultados do estudo realizado com dispositivos GEM (*Gas Electron Multiplier*) no Laboratório do Sistema de Detecção, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, são relatados. São apresentados resultados de ganho do dispositivo em função da alta tensão aplicada em detectores triplo-GEM, para as misturas gasosas Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25) e Ar/CO<sub>2</sub>(70/30) à pressão atmosférica usando raios-X de 5,9 keV. Além disso, medidas de atraso e de impedância característica para uma linha de retardo discreta composta por 44 células são apresentadas. Foi analisada a resposta da linha para um pulso rápido (tempo de subida inferior a 10 ns) e para sinais induzidos no Anodo X&Y, quando da ocorrência de uma avalanche eletrônica em um ponto do detector.

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

**Abstract:** The results of the study carried out with GEM (*Gas Electron Multiplier*) devices in the Detection System Laboratory, of the Brazilian Center for Physical Research, are reported. Results of device Gain as a function of the high voltage applied to the triple-GEM detectors, for the gas mixtures Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25) and Ar/CO<sub>2</sub>(70/30) at atmospheric pressure and using 5.9 keV X-rays, are presented. Besides, the measurements of total delay and characteristics impedance for a discrete delay line composed of 44 cells are also presented. It has been analyzed the response of the delay line to a fast pulse (rise time less than 10 ns) and for the signals induced at the X&Y Anode, when an electronic avalanche is generated at a certain point in the detector.

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

### 1. INTRODUÇÃO

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

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. Anos mais tarde, foi lançado em 1988 o contador a gás com micropistas (*Microstrips Gas Counter* – MSGC) [2], que substitui os fios por trilhas condutoras de larguras e distâncias micrométricas depositadas sobre um substrato de vidro e, portanto, permite menor tempo de coleta de carga. A partir daí, uma gama de micro-dispositivos, com as mais variadas geometrias, foram lançados: o Microdot 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 destacam 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 por uma fina camada metálica perfurada com uma matriz de pequenos furos. A aplicação de um potencial elétrico entre os eletrodos do GEM cria um campo elétrico de dipolo forte, responsável por uma eficiente focalização de elétrons no interior dos canais do dispositivo. Esse modo de operação também viabiliza a multiplicação de elétrons por meio da quebra das moléculas do gás. Maiores ganhos podem ser obtidos utilizando múltiplos GEMs montados em cascata. Nesta arquitetura, os campos elétricos entre GEMs devem ser otimizados para fornecer a máxima transferência da avalanche eletrônica, minimizando as perdas de elétrons nos eletrodos do GEM [7].

O presente trabalho apresenta os resultados do estudo realizado em dispositivos GEM padrão CERN (que utilizam Kapton como isolante), incluindo resultados de ganho e estabilidade de um detector Triplo-GEM, utilizando diferentes

misturas gasosas. Este trabalho também apresenta um estudo do Anodo X&Y e das técnicas de linhas de retardo.

## 2. INSTRUMENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS DE MEDIDAS

### 2.1. O GEM

O dispositivo GEM surgiu em 1997 [6] como mais um microdispositivo entre outros criados naquela década; ele atua no interior do detector como um amplificador de elétrons no gás (Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O), diferindo dos outros dispositivos principalmente por separar as regiões de multiplicação eletrônica e de indução/coleta dos elétrons.

Os GEMs são fabricados por processo de litografia óptica [8]. Primeiramente, toma-se uma folha de Kapton de 50 µm de espessura coberta com filme de cobre (5 a 8 µm) em ambas as superfícies e deposita-se sobre o cobre um filme fotossensível (*photoresist*). Em seguida, máscaras contendo o padrão de furação desejado são alinhadas e posicionadas sobre as faces da peça. Com exposição à luz este padrão é transferido para o filme. Após a revelação, a parte removida de *photoresist* expõe a superfície de cobre, permitindo o início dos processos de corrosão; primeiro o do cobre e, em seguida, do Kapton. No final, remove-se o *photoresist* remanescente. O resultado deste processo é um canal em forma bicônica com um estreitamento no centro (do Kapton) e maior abertura nas faces metálicas. Os dispositivos são constituídos por uma matriz de pequenos furos, tipicamente espaçados de 100 a 200 µm entre si e com diâmetros de 50 a 100 µm.

Todos os três dispositivos GEMs foram testados individualmente através da medida de corrente de fuga.

O teste de corrente de fuga é simples e consiste, basicamente, em avaliar a corrente drenada pelo dispositivo em função da variação de tensão aplicada a cada face do GEM. Observando o comportamento da corrente de fuga de cada dispositivo, foi possível selecionar os dispositivos de melhor desempenho, i.e., aqueles que apresentaram menor corrente. A corrente de fuga é decorrente da resistência de isolamento. A variação da tensão deve provocar uma pequena variação (ou nula) da corrente, devido à resistividade intrínseca do material dielétrico utilizado (neste caso, o Kapton). A tensão máxima aplicada entre as faces de cada um dos três dispositivos GEM foi de  $\Delta V = 400V$ , sendo observada uma corrente de fuga máxima de aproximadamente 4 nA para cada GEM. De acordo com experiência anteriores com dispositivos GEM, consideramos satisfatórios apenas os dispositivos que apresentaram corrente de fuga menor ou igual a 10 nA. Desta forma, assumimos que, acima deste patamar, o dispositivo não apresentaria isolamento adequado entre as duas faces metálicas do GEM.

### 2.2. Detector triplo – GEM

A primeira etapa deste projeto resultou na montagem de um detector Triplo-GEM. Uma das características principais dos detectores que utilizam os dispositivos GEM é a possi-

bilidade de arranjos em cascata (um sobre o outro), como observado na figura 1.

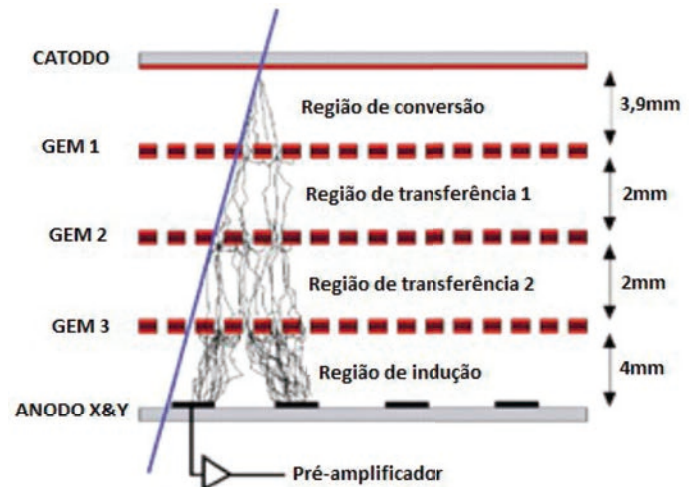


Figure 1: Imagem do dispositivo triplo-GEM.

Quando o detector é iluminado por uma fonte de <sup>55</sup>Fe, por exemplo, os fótons interagem com as moléculas do gás (Ar/CO<sub>2</sub>) através do efeito fotoelétrico. A interação do fóton com o gás gera um certo número de pares de elétrons-íons. Os elétrons ejetados dos átomos têm energia suficiente para ionizar outros átomos, criando novos pares [9]. O número de cargas primárias pode ser calculado por:

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

onde  $n_p$  é o número de cargas primárias,  $E_\gamma$  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 CO<sub>2</sub>, respectivamente [9]. 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 primeiro GEM, onde, na presença de campos elevados ( $< 50 \text{ kV/cm}$ ), são multiplicados. No interior do canal do dispositivo, o processo de avalanche eletrônica se inicia.

Essa avalanche inicial é transferida em seguida para a primeira região de transferência. Nessa região, a avalanche eletrônica é coletada e arrastada para o segundo GEM. No segundo GEM, os elétrons da avalanche eletrônica são novamente multiplicados, convergindo para a segunda região de transferência, onde a avalanche agora é coletada e arrastada para o terceiro GEM, onde ocorre uma nova multiplicação. Por fim, os elétrons convergem para a região de indução, onde são arrastados até ao anodo X&Y e coletados por este [10]. O anodo X&Y fica a uma distância de 4 mm do último GEM. As distâncias das regiões de conversão e de transferência 1 e 2 são de 3,9 mm e 2,0 mm, respectivamente. A janela do detector é composta 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 no anodo foi realizada por meio de um circuito de desacoplamento com um amplificador de carga (modelo Ortec 142H, com sensibilidade de 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/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25) e Ar/CO<sub>2</sub>(70/30), utilizando-se uma fonte de <sup>55</sup>Fe com emissão principal de raios-X de energia 5,9 keV.

Os GEMs e a malha de aço, usada como catodo, foram instalados em uma base de material FR4, fixada sobre uma placa de acrílico. Tudo acondicionado dentro de uma caixa de alumínio, como mostrado na figura 2.

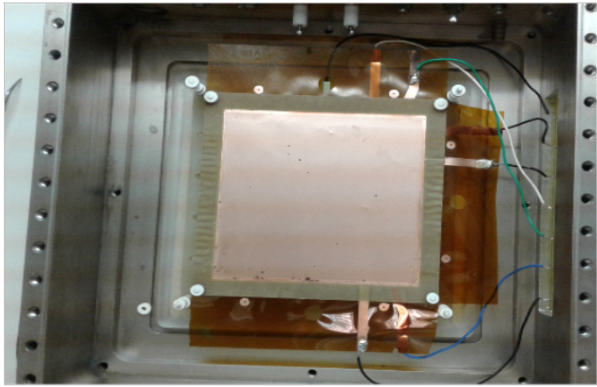


Figure 2: Montagem do dispositivo triplo-GEM.

### 2.3. O Anodo X&Y

No detector triplo-GEM desenvolvido os elétrons primários são gerados na região de conversão. Após a multiplicação gasosa no primeiro GEM, a maioria dos elétrons secundários é transferida para o interior dos furos do segundo GEM. Finalmente, a carga gerada no último GEM é direcionada para a região de indução onde pode ser amostrada pelo Anodo X&Y.

O Anodo X&Y é um circuito impresso multicamada projetado no LSD (Laboratório de Sistemas de Detecção, CBPF) que tem um conjunto de ilhas amostradoras de carga induzida. Metade destas ilhas é conectada através de furos metalizados a pistas condutoras situadas numa camada inferior, relacionada a uma das coordenadas de posição. A outra metade das ilhas é igualmente ligada a outras pistas, situadas em outra camada, relacionadas com a segunda coordenada. O anodo X&Y tem área ativa de  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ , com cerca de 70% de área sensível. As dimensões são mostradas no desenho esquemático na figura 3.

Conforme descrito acima, o circuito Anodo X&Y tem três camadas. Devido à proximidade entre as pistas, pode-se deduzir as seguintes capacitâncias parasitas: entre pistas de uma mesma camada ( $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ) e entre pistas de camadas diferentes ( $C_{12}$ ) [10]. Os valores medidos destas capacitâncias estão dispostos na Tab. 1.

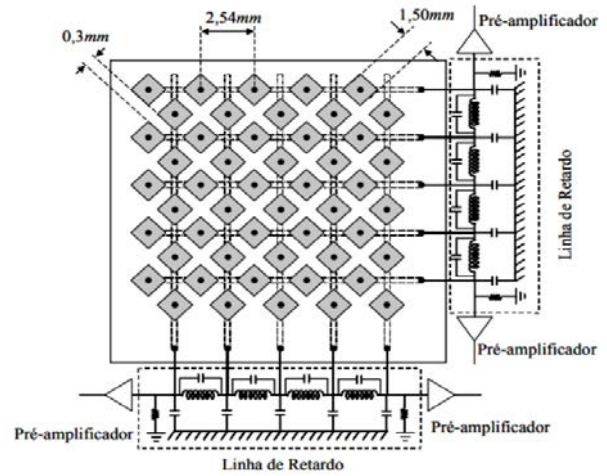


Figure 3: Anodo X&Y com linha de retardo.

| Capacitâncias |                              |
|---------------|------------------------------|
| $C_{11}$      | $(32,8 \pm 0,8) \text{ pF}$  |
| $C_{12}$      | $(0,39 \pm 0,02) \text{ pF}$ |
| $C_{22}$      | $(33,1 \pm 0,7) \text{ pF}$  |

Tabela 1: Valores de capacitâncias parasitas no Anodo X&Y.

### 2.4. Linha de Retardo

Uma técnica de localização bidimensional possível empregada para detectores de raios-X sensíveis à posição é aquela que utiliza linhas de retardo com elementos indutores (L) e capacitivos (C) arranjados em uma configuração LC onde células com estes elementos são distribuídas em série ao longo da linha. Cada célula de atraso é um filtro LC montado na configuração 'pi', como ilustra a figura 4. Cada célula impõe atraso de propagação ao sinal com valor fixo  $T = \sqrt{LC}$ . A impedância característica da linha de retardo é dada por  $Z = \sqrt{LC}$  [11].

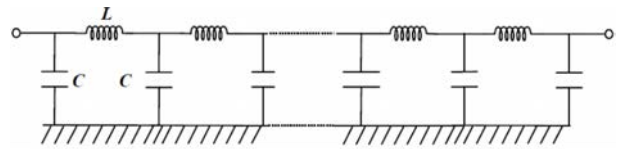


Figure 4: Circuito de uma linha de retardo discreta composta por filtros LC.

O método de localização por linhas de retardo é empregado para encontrar as coordenadas X e Y do evento ionizante no detector triplo-GEM. Para a localização bidimensional, duas linhas de retardo são conectadas aos dois conjuntos de pistas associadas aos elementos coletores do Anodo X&Y, como mostrado na figura 3. Utilizou-se duas linhas de retardo do tipo discretas desenvolvidas no LSD, cada

uma composta por 44 filtros LC utilizando componentes para montagem em superfície (SMD – *Surface Mount Devices*). As linhas são denominadas linha X e Y, e os valores dos componentes são:  $L = 1,7 \mu\text{H} \pm 5 \%$  e  $C = 7 \text{ pF} \pm 5 \%$ . Com estes valores, calcula-se o retardo total da linha em aproximadamente 151,78 ns e impedância característica de 492,80  $\Omega$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caracterização do Detector Triplo-GEM

##### 3.1.1. Estudo do Ganho

Primeiramente, foi realizada a caracterização do detector triplo-GEM, através do levantamento de sua curva de ganho efetivo. O ganho efetivo de um detector GEM é dado pela leitura dos elétrons capturados no anodo, originados a partir de cada elétron primário gerado na região de conversão [7].

Utilizando os dispositivos GEM padrão CERN foi realizada a montagem de um detector Triplo-GEM conforme a figura 1. O desempenho do referido detector foi estudado por meio da obtenção das curvas de ganho, utilizando as misturas gasosas  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$  e  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$  à pressão atmosférica, como apresentado na figura 5.

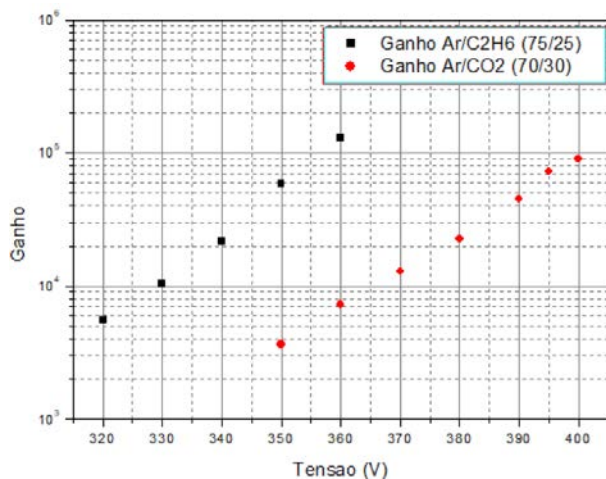


Figure 5: Curva de ganho do detector triplo-GEM utilizando diferentes misturas gasosas.

Comparando-se as curvas de ganho na Fig. 5, observa-se que o ganho máximo de  $1,29 \times 10^5$  é alcançado com tensão de operação de aproximadamente 360 V, para a combinação  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$ . No caso do  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$ , o ganho máximo de  $8,98 \times 10^4$  é alcançado com tensão de operação em 400 V.

Pode ser observado ainda que, ao se comparar as curvas de ganho, o ganho máximo - de  $10^4$  ( $\text{Ar}/\text{CO}_2$ ) e  $10^5$  ( $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$ ) - é atingido com tensões de operação menores para a mistura  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$ . Isto se explica devido ao comportamento da seção de choque molecular com o aumento da energia dos elétrons, variável de acordo com o gás [12]. Alguns gases

mantêm os elétrons à baixa energia mesmo quando submetidos a valores de campo elétricos mais altos como, por exemplo, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 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 do elétron [10]. Como consequência, as propriedades de velocidade de arrasto, 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 arrasto de elétrons, interferindo consideravelmente no ganho do detector [13].

Portanto, percebe-se que a mistura gasosa utilizada influencia diretamente o desempenho do detector. A escolha da mistura gasosa pode 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.

Alguns parâmetros geométricos que podem ser otimizados na busca do melhor desempenho de um detector tipo GEM são as dimensões escolhidas para as regiões de transferência e indução, bem como os campos elétricos aplicados nas mesmas.

##### 3.1.2. Estudo da reprodutibilidade e estabilidade do detector triplo-GEM

Segundo Tauhata [14], para que um dispositivo seja classificado como um detector é necessário que, além de ser adequado para a medição do mensurando, apresente nas sequências de medição algumas características, tais como: repetitividade, reprodutibilidade, estabilidade, exatidão, precisão, sensibilidade e eficiência.

**Reprodutibilidade:** grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição.

**Estabilidade:** aptidão de o instrumento conservar constantes suas características de medição ao longo do tempo [14];

Neste trabalho, iremos testar a reprodutibilidade e a estabilidade do detector triplo-GEM.

##### 3.1.2.1 Estudo da Reprodutibilidade

Os parâmetros geométricos e de campos elétricos utilizados na montagem do triplo-GEM foram:

- distância e campo de conversão: 3,9 mm e 1,5 kV/cm;
- distância e campo de transferência 1: 2,0 mm e 2 kV/cm;
- distância e campo de transferência 2: 2,0 mm e 2 kV/cm;
- distância e campo de indução: 4 mm e 3 kV/cm.

Primeiramente, foi feito o levantamento do ganho do detector iluminado por uma fonte  $^{55}\text{Fe}$ , através dos sinais observados na parte superior (*top*) do terceiro dispositivo GEM. As medidas foram realizadas em três horários distintos - 13:00, 15:30 e 18:00 - para a combinação gasosa  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$ . Para a combinação  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$  foram realizadas medidas nos horários 13:00 e 15:30. A limitação a esses dois horários para a combinação gasosa de  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6$  foi decidida a fim de evitar a queima dos dispositivos GEM devido a descargas (*sparks*). Todas as medidas foram feitas



em dois dias consecutivos, denominados 'Dia 1' e 'Dia 2'. A figura 6 mostra as proximidades entre as curvas de ganho de cada combinação gasosa.

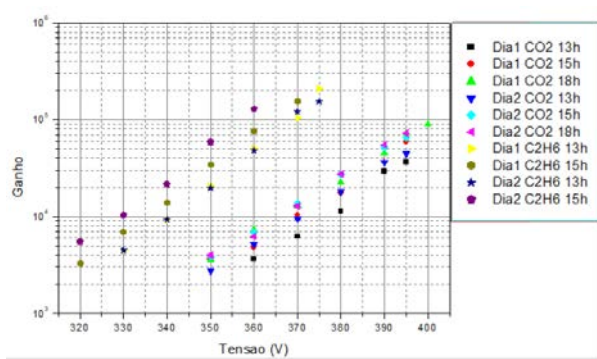


Figure 6: Reprodutibilidade da Curva de ganho para diferentes combinações gasosas.

Observa-se que, para a combinação gasosa  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$ , as curvas de ganho do dia 1 e do dia 2 no horário das 13:00 estão praticamente sobrepostas, demonstrando a característica de reprodutibilidade do detector. Para o horário das 15:00, vemos que a curva do dia 2 está um pouco acima da curva do dia 1, ou seja, a estabilidade do detector foi alcançada mais rapidamente no dia 2. Por isso, o ganho no dia 2 é sensivelmente superior ao ganho no dia 1.

Quando se observa as medidas feitas no mesmo dia, mas em horários diferentes, a diferença na curva de ganho se dá pelo tempo de estabilização. Quanto mais cedo medimos o ganho, menos estável está o detector, ou seja, seu ganho é menor em relação às medidas feitas às 15:00, quando o detector se encontra mais estável, como mostra a figura 6. A estabilidade do detector está diretamente relacionada ao tempo em que o gás está fluindo em seu interior. Quanto maior este tempo, mais estável estará o detector para uso, devido a diminuição da contaminação do gás. Outro fator importante para a estabilidade do detector é a eletrônica utilizada, como: fontes de alta tensão, pré-amplificadores, fontes DC para o pré-amplificador, etc. Um fator crucial para a estabilidade se refere a falhas, ou imperfeições, na construção do dispositivo. Essas falhas, como pontas de cobre ou pedaços de Kapton, podem prejudicar a formação do campo elétrico no interior do canal do GEM.

Com base nos resultados mostrados na figura 6, conclui-se que o detector triplo-GEM possui adequada reprodutibilidade.

### 3.1.2.2 Estudo da Estabilidade do detector triplo-GEM

A fim de observar o comportamento do detector triplo-GEM, operando com as misturas gasosas  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$  e  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$  a pressão atmosférica, foram realizadas medidas de estabilidade do ganho ao longo do tempo. Nas figuras 7 e 8 são apresentados os resultados do comportamento do ganho do detector durante período de seis horas, quando iluminado por uma fonte de  $^{55}\text{Fe}$ .

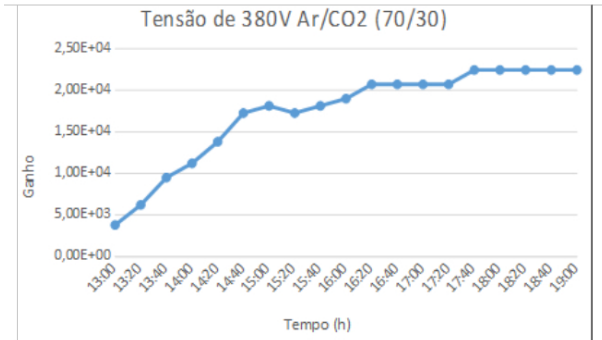


Figure 7: Variação do ganho usando um pré-amplificador de carga, durante seis horas, para a mistura gasosa  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$ .

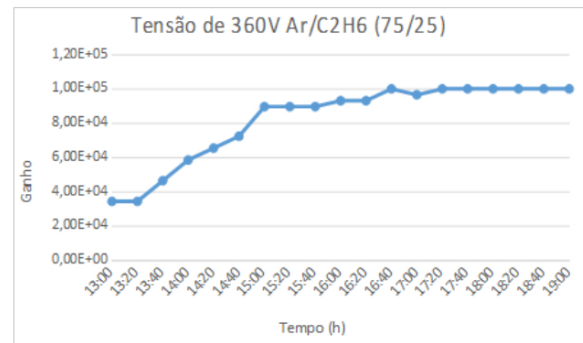


Figure 8: Variação do ganho usando um pré-amplificador de carga, durante seis horas, para a mistura gasosa  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$ .

Baseando-se nos estudos apresentados anteriormente Foram estabelecidas as diferenças de potencial aplicadas aos dispositivos GEM de  $\Delta V = 380 \text{ V}$  e  $\Delta V = 360 \text{ V}$ , para as misturas gasosas  $\text{Ar}/\text{CO}_2(70/30)$  e  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_6(75/25)$ , respectivamente.

Na figura 7, foi observado que, aproximadamente, entre 13h00 e 16h20 ocorreu uma variação no ganho do detector ( $3,83 \times 10^3$  a  $2,07 \times 10^4$ ), ou seja, uma variação absoluta de  $1,69 \times 10^4$ . A partir das 16h20, o ganho do detector atingiu um patamar de equilíbrio que durou até o final da medida, às 19h00 (ganho entre  $2,07 \times 10^4$  e  $2,24 \times 10^4$ ). Assim, conclui-se que o detector levou aproximadamente 3 horas e 20 minutos para entrar numa região de estabilidade de operação.

Na figura 8, foi observado que, aproximadamente, de 13h20 às 15h00, o ganho do detector teve um comportamento variável, até atingir um patamar de equilíbrio que durou até o final da medida às 19h00 (ganho entre  $8,98 \times 10^4$  e  $1,00 \times 10^5$ ). Portanto, conclui-se que detector levou aproximadamente 2 horas para entrar numa região de estabilidade de operação.

## 3.2. Caracterização da linha de retardo

Nesta seção, descreveremos medidas de caracterização das linhas de retardo X e Y, tais como: determinação da

impedância característica, atraso total e atenuação de amplitude.

Para realizarmos as medidas, usamos pulsos de 1 V, 1 kHz de frequência de repetição e 100 ns de largura.

### 3.2.1. Impedância característica

O esquema experimental usado para determinar a impedância característica da Linha de Retardo é mostrado na figura 9.

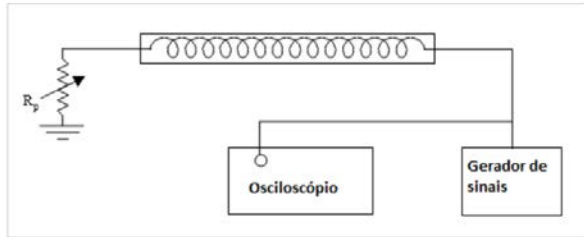


Figure 9: Esquema usado para determinar a impedância característica da linha de retardo.

Um pulso é injetado em uma das extremidades da linha de retardo, e na outra é colocado um resistor variável (potenciômetro). Este pulso é enviado também para o osciloscópio, no qual observamos então os pulsos enviados e refletido, como mostra a figura 10.

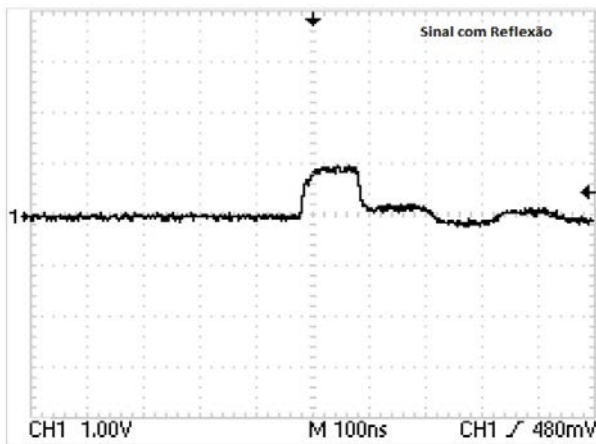


Figure 10: Pulso enviado e pulso refletido observados no osciloscópio.

O potenciômetro é ajustado até se encontrar um valor que minimize a reflexão do sinal, como mostra a figura 11.

O valor de resistência medido no resistor variável, quando ocorre a mínima reflexão, é de 498,8  $\Omega$ . Este valor corresponde aproximadamente à impedância característica da linha de atraso. Um resistor de valor o mais próximo possível de 498,8  $\Omega$  deve terminar o circuito da linha de atraso.

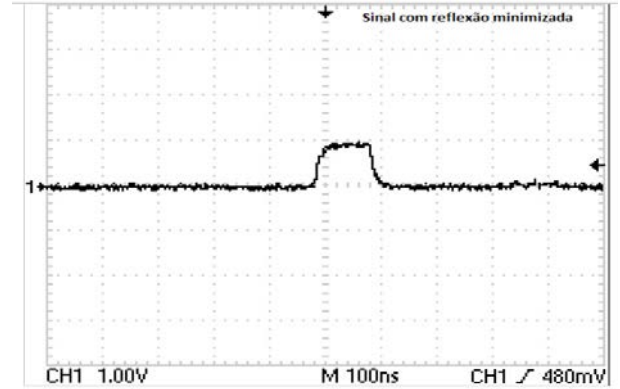


Figure 11: Sinal com reflexão minimizada observado no osciloscópio.

### 3.2.2. Retardo

A figura 12 ilustra o esquema usado para medir o atraso total da linha de retardo. Injetamos um pulso em uma de suas extremidades e observamos o sinal de saída na outra extremidade.

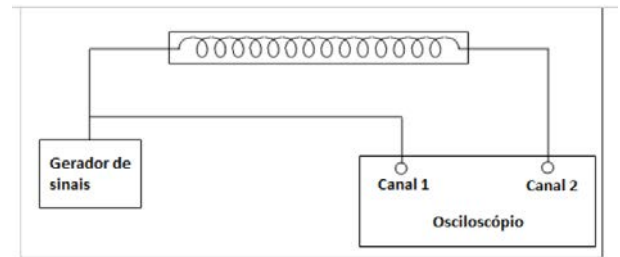


Figure 12: Esquema usado para determinar o atraso total da linha de retardo.

O intervalo de tempo entre os dois sinais é considerado o atraso total da linha de retardo  $\tau$ , como mostra a figura 13.

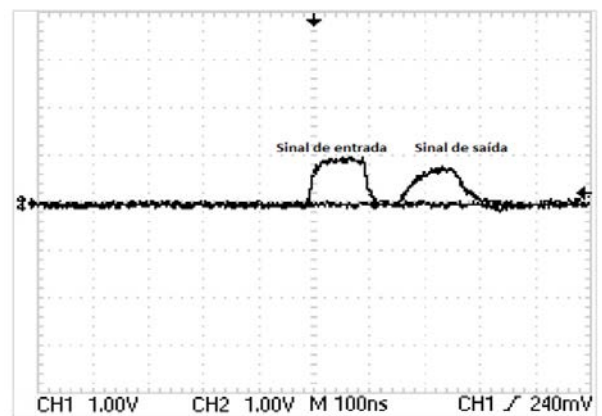


Figure 13: Sinais na entrada e na saída da linha de retardo  $\tau$ . O atraso total da linha é de aproximadamente 160 ns.

Para a linha X, o atraso também é de aproximadamente 160 ns, como mostra a figura 14.

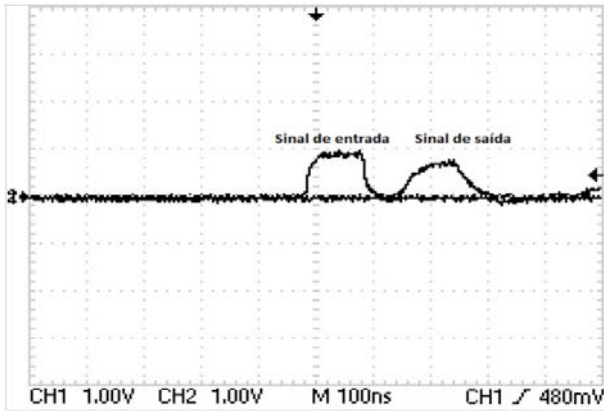


Figure 14: Sinais na entrada e na saída da linha de retardo X. O atraso total da linha é de aproximadamente 160 ns.

O valor obtido foi de, aproximadamente, 160 ns tanto para a linha X quanto para linha Y, ou seja, 3,63 ns/célula. Este valor é um pouco superior, cerca de 6%, ao valor calculado no item 2.4 desta nota. Os efeitos de capacitâncias parasitas e de indutâncias mútuas podem explicar essa diferença. Esses efeitos podem aumentar os valores efetivos de L e C e, portanto, aumentar o atraso total. Outro fator importante a ser levado em consideração é a amplitude do sinal. Nos dois casos - X e Y - vemos que o sinal de entrada tem uma amplitude maior que o sinal de saída. Essa queda de amplitude é causada por perda de potência do sinal ao longo das resistências parasitas (do componente indutivo L e das trilhas condutoras) da linha.

### 3.2.3. Localização bidimensional

Conforme o item 2.3 desta nota técnica explica, os sinais (carga elétrica) induzidos no anodo X&Y, quando da ocorrência de uma avalanche eletrônica em um ponto do detector, são utilizados para determinar as coordenadas X e Y desta avalanche.

O arranjo mostrado na figura 15 destina-se à identificação das coordenadas do evento ionizante, onde temos o Anodo X&Y, a linha de retardo e quatro pré-amplificadores de tensão desenvolvidos pelo LSD (*Laboratório de Sistemas de Detecção*), no CBPF.

No sistema da figura 15, cada evento ionizante dá origem a cinco sinais a serem lidos pela eletrônica: um sinal imediato coletado pelo *top* do GEM mais próximo do anodo e quatro pulsos elétricos, um em cada extremo das duas linhas de retardo. Todos estes sinais são processados individualmente dentro de uma janela de tempo pré-definida. Inicialmente os pulsos elétricos são coletados pelos pré-amplificadores, nos quais são amplificados de modo a aumentar a relação sinal/ruído (SNR). A figura 16 mostra os sinais observados na saída dos pré-amplificadores de tensão conectados à linha de retardo X.

De acordo com a figura 16, podemos ver que o evento ocorreu mais ou menos próximo a uma das extremidades da

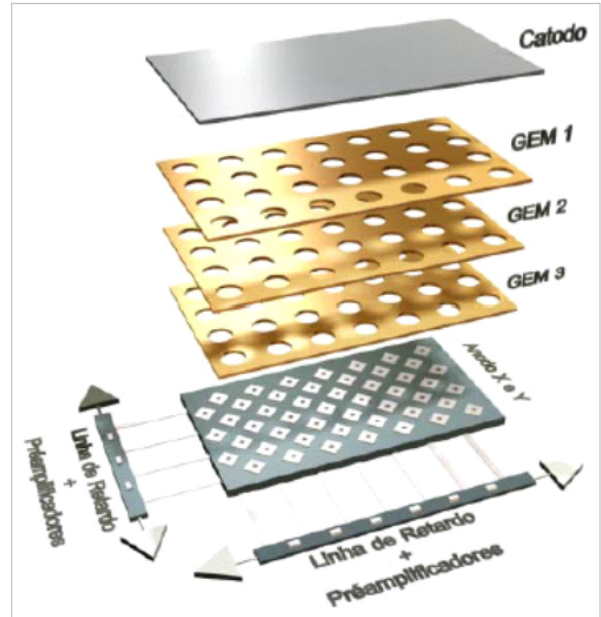


Figure 15: Sistema de leitura de sinais para localização bidimensional.

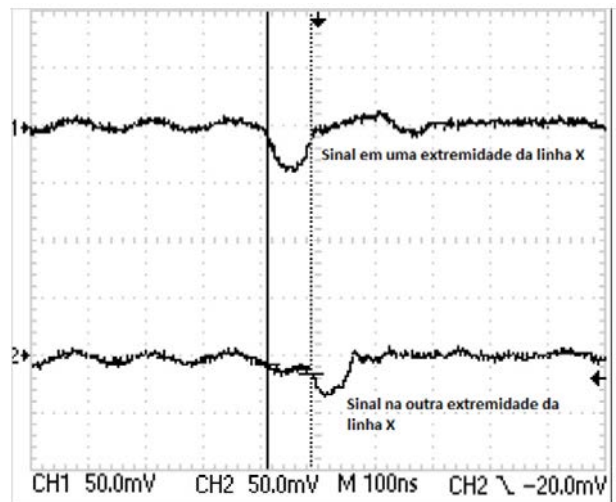


Figure 16: Sinais observados na saída dos pré-amplificadores de tensão.

linha de retardo X dando um retardo entre os sinais de aproximadamente 95 ns.

## 4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um detector multi-GEM utilizando dispositivos GEM fabricados no CERN (<https://home.cern>). Ademais, utilizou-se uma placa de circuito impresso multicamadas como eletrodo sensível à posição, e a técnica de localização por linha de retardo, ambas desenvolvidas pelo Laboratório de Sistemas de Detecção, do CBPF.

Um detector triplo-GEM, com área ativa 10 x 10 cm<sup>2</sup>



foi construído, incluindo três folhas do dispositivo GEM e a placa de circuito impresso multicamadas (Catodo X&Y), conectada a duas linhas de retardo. O detector triplo-GEM foi testado através do estudo dos sinais no topo do último dispositivo GEM, operando com as misturas gasosas Ar/CO<sub>2</sub>(70/30) e Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25) a pressão atmosférica (fluxo contínuo) e iluminado por fonte de <sup>55</sup>Fe (raios-X de 5,9 keV).

Durante o trabalho, concluiu-se que o ganho máximo de  $1,29 \times 10^5$  é alcançado com tensão de operação 360 V para a combinação Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25). No caso do Ar/CO<sub>2</sub>(70/30), o ganho máximo obtido foi de  $8,98 \times 10^4$  com tensão de operação de 400 V. Ao se comparar as curvas de ganho do detector triplo-GEM utilizando misturas gasosas diferentes, os ganhos de  $10^4$  e  $10^5$  são atingidos com tensões de operação menores para a mistura gasosa Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25). Destarte, confirmou-se que a mistura gasosa utilizada influencia diretamente no desempenho do detector.

Em relação ao estudo da reprodutibilidade, foi feito o levantamento do ganho do detector em três horários diferentes - 13:00, 15:30 e 18:00 - para a combinação gasosa Ar/CO<sub>2</sub>(70/30) e, para a combinação de Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25), nos horários de 13:00 e 15:30. O detector triplo-GEM obteve uma reprodutibilidade adequada para as duas misturas gasosas, com a maioria das curvas sobrepostas como mostrou a figura 6.

Foram realizadas medidas de estabilidade do ganho ao longo de seis horas a fim de observar o comportamento do detector triplo-GEM, operando-se com as misturas gasosas Ar/CO<sub>2</sub>(70/30) e Ar/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(75/25) sob pressão atmosférica e com os campos de transferência e indução otimizados. Deste estudo, concluiu-se que o detector atinge uma região de operação estável após cerca de 2h de operação contínua.

Durante o estudo da linha de retardo, verificou-se que a melhor terminação é de 498,8Ω, e que esta linha possui um atraso total de aproximadamente 160 ns, tanto a linha X quanto a linha Y. Este atraso é considerado adequado para a aquisição de imagem utilizando um detector triplo-GEM.

Em relação ao Anodo X&Y, que é conectado diretamente à linha de retardo, cada evento ionizante dá origem a dois pulsos elétricos. Sinais anódicos referentes às extremidades de uma das linhas de retardo foram mostrados na figura 16 com atraso de 95 ns.

Finalmente, tomando por base todos os resultados apresentados, constatou-se que o detector triplo-GEM e os dispositivos desenvolvidos no LSD/CBPF funcionaram de forma satisfatória, mostrando viabilidade do uso da técnica de localização espacial por linhas de retardo com elementos discretos para detectores de raios X a gás que utilizam dispositivo GEM e eletrodo X&Y.

### 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] S.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] 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.
- [8] O. Bouianov *et. al.*, Foil geometry effects on GEM characteristics, *Nucl. Instrum. and Meth.* A 458 (2001) 698.
- [9] F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. CERN 77 – 09 (1977).
- [10] 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.
- [11] G.P. Guedes, A. Breskin, R. Chechik, D. Vartsky, D. Bar, A.F. Barbosa, P.R.B. Marinho, Two-dimensional GEM imaging detector with delay-line readout, *Nucl. Instrum. and Meth.* A 513 (2003) 473-483.
- [12] 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.
- [13] F. Sauli, *Gaseous Radiation Detectors Fundamentals and Applications*, Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, 36 (2014).
- [14] Tauhata, L., Salati, I. P. A., Di Prinzio, R., Di Prinzio, M. A. R. R.; Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão novembro/2013 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 345p.

Notas Técnicas é uma publicação de trabalhos técnicos relevantes, das diferentes áreas da física e afins, e áreas interdisciplinares tais como: Química, Computação, Matemática Aplicada, Biblioteconomia, Eletrônica e Mecânica entre outras.

Cópias desta publicação podem ser obtidas diretamente na página web <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt> ou por correspondência ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brasil  
E-mail: [alinecd@cbpf.br](mailto:alinecd@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>

Notas Técnicas is a publication of relevant technical papers, from different areas of physics and related fields, and interdisciplinary areas such as Chemistry, Computer Science, Applied Mathematics, Library Science, Electronics and Mechanical Engineering among others.

Copies of these reports can be downloaded directly from the website <http://notastecnicas.cbpf.br> or requested by regular mail to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brazil  
E-mail: [alinecd@cbpf.br](mailto:alinecd@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>