



**CARACTERIZACIÓN Y PRUEBA  
DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN  
TRIPLE-GEM  
A PARTIR DE MUONES  
RESULTANTES DE RAYOS CÓSMICOS**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
Departamento de Física

**Tesis de Maestría.**

Presentado por:  
**Luis Fernando Cruz Wilches**

Asesor:  
**Bernardo Gómez Moreno Dr.Rer.Nat**

Bogotá, 31 de octubre de 2014

**CARACTERIZACIÓN Y PRUEBA  
DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN  
TRIPLE-GEM  
A PARTIR DE MUONES  
RESULTANTES DE RAYOS CÓSMICOS**

Presentado por:

**Luis Fernando Cruz Wilches**

**Tesis de Maestría.**

Aprobado por:

---

**Bernardo Gómez Moreno Dr.Rer.Nat**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**

Departamento de Física

Bogotá, 31 de octubre de 2014

---

# Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y el estímulo del Doctor Bernardo Gómez Moreno, bajo cuya supervisión escogí este tema y comencé el trabajo.

A los ingenieros adscritos al departamento de física Leonardo Aguilar, Jhonny Turizo, Luis Carlos Gómez un agradecimiento especial por su invaluable ayuda técnica.

Agradezco también a Diego Sanz Físico, Ingeniero y Master en Ingeniería por su invaluable ayuda y experiencia en procedimientos experimentales.

Al Departamento de Física y a la Universidad de los Andes doy las gracias por el apoyo que he recibido durante estos tres años para el desarrollo de mi maestría.

A mi esposa gracias infinitas por su apoyo y paciencia durante el desarrollo de mis estudios.

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	9
1.2. Motivación . . . . .	12
1.3. Objetivos . . . . .	13
1.3.1. Objetivo General . . . . .	13
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	13
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>14</b>
2.1. Detectores Gaseosos . . . . .	14
2.1.1. Interacción de Partículas Cargadas Relativistas con Materia . .	15
2.1.2. Interacción de Fotones con Materia . . . . .	15
2.1.3. Interacción de Electrones con Materia . . . . .	18
2.2. Producción de Pares Ion-Electrón . . . . .	19
2.2.1. Movilidad de los Iones en Presencia de un Campo Eléctrico . .	20
2.2.2. Movilidad de los Electrones en Presencia de un Campo Eléctrico	20
2.2.3. Amplificación . . . . .	21
2.2.4. Mezcla de Gases (Quencher) . . . . .	22
<b>3. Detector Triple GEM</b>	<b>23</b>
3.1. Prototipo 1.0 Detector TGEM . . . . .	24
3.1.1. Modificaciones . . . . .	25
3.1.2. Almacenamiento y Pruebas de calidad . . . . .	26
3.2. Ensamble . . . . .	29
3.2.1. Componentes Principales . . . . .	29
3.2.2. Ambiente Controlado (Sala Limpia) . . . . .	30

3.2.3. Ensamble Principal . . . . .	30
3.2.4. Componentes Adicionales . . . . .	33
<b>4. Caracterización</b>	<b>38</b>
4.1. Implementos e Instrumentos de Medida . . . . .	38
4.2. Resolución de Energía . . . . .	39
4.3. Resolución de Posición . . . . .	46
4.4. Ganancia . . . . .	47
4.5. Resolución de Tiempo . . . . .	52
4.6. Medida de Fondo de Muones Resultantes de Rayos Cósmicos . . . . .	53
<b>5. Simulación</b>	<b>55</b>
5.1. CELL . . . . .	55
5.2. FIELD . . . . .	56
5.3. GAS . . . . .	57
5.4. DRIFT . . . . .	58
5.5. SIGNAL . . . . .	59
<b>6. Conclusiones</b>	<b>61</b>

---

# Índice de figuras

1.1.	Zonas de la cámara de ionización GEM. Tomada de [3] . . . . .	11
2.1.	Tasa de energía perdida para diferentes partículas en diferentes medios. Tomada de [15] . . . . .	16
2.2.	Sección transversal como función de la energía para Carbono y Plomo. Tomada de [15] . . . . .	17
2.3.	Razón entre la taza de energía perdida por unidad de longitud y por unidad de energía en función de la energía incidente. Tomada de [15] . .	18
3.1.	Geometría de una placa GEM (GEMfoil). Las medidas están en $\mu\text{m}$ . Tomado de [10]. . . . .	23
3.2.	Estructura y regiones de un detector TGEM. . . . .	24
3.3.	Partes del detector Triple GEM. a. GEM foil, b. Cátodo, c. Cuerpo del detector y ventana, d. Tapa superior y ventana, e. Ánodo segmentado con resolución espacial 1D, f. Estructura parcialmente ensamblada. . .	25
3.4.	Modificaciones realizadas al ánodo. Sujetadores de presión para los GEM- foils y el Cátodo. . . . .	26
3.5.	Modificaciones realizadas a la caja de paso estanca. a. Antes, b. Después. .	27
3.6.	Esquema del circuito de prueba. . . . .	27
3.7.	Corrientes de fuga GEM 1. . . . .	28
3.8.	Corrientes de fuga GEM 2. . . . .	28
3.9.	Corrientes de fuga GEM 3. . . . .	29
3.10.	a) Tornillos plásticos sustento de los GEMfoil al interior del la cámara de ionización y separadores. b) Distancias establecidas con los separadores. .	31
3.11.	Sujetadores en cobre. . . . .	32

3.12. a) Volumen a punto de ser sellado con los tornillos. b) Cuerpo plástico donde se observa la ranura para el empaque, la cubierta superior y la lámina de Kapton. . . . .	32
3.13. Ensamble final del cuerpo principal del detector. . . . .	33
3.14. a) Esquema del divisor de voltaje. b) Divisor de voltaje diseñado con los terminales de los GEMfoils invertidos. . . . .	34
3.15. a) Esquema conector. b) Conector en modo de altura de pulso. . . . .	36
3.16. Ensamble final del detector TGEM. . . . .	37
 4.1. Espectro de la muestra de $^{55}\text{Fe}$ tomada con $\Delta\text{VGEM}=256\text{V}$ , $E_{drift}=1.2\text{kV/cm}$ y $E_{trans}=E_{coll}=1.9\text{kV/cm}$ . . . . .	39
4.2. Pico de escape del argón para un potencial $\Delta\text{VGEM}=260\text{V}$ con una resolución de energía de 41.6 %. . . . .	40
4.3. Pico para $^{55}\text{Fe}$ de 5.9keV $\Delta\text{VGEM}=260\text{V}$ con una resolución de energía de 27.8 %. . . . .	41
4.4. Pico de escape del argón para un potencial $\Delta\text{VGEM}=256\text{V}$ con una resolución de energía de 37.9 %. . . . .	41
4.5. Pico para $^{55}\text{Fe}$ de 5.9keV $\Delta\text{VGEM}=256\text{V}$ con una resolución de energía de 26.7 %. . . . .	42
4.6. Pico de escape del argón para un potencial $\Delta\text{VGEM}=252\text{V}$ con una resolución de energía de 36.1 %. . . . .	42
4.7. Pico para $^{55}\text{Fe}$ de 5.9keV $\Delta\text{VGEM}=252\text{V}$ con una resolución de energía de 26.5 %. . . . .	43
4.8. Pico de escape del argón para un potencial $\Delta\text{VGEM}=246\text{V}$ con una resolución de energía de 41.0 %. . . . .	43
4.9. Pico para $^{55}\text{Fe}$ de 5.9keV $\Delta\text{VGEM}=246\text{V}$ con una resolución de energía de 26.1 %. . . . .	44
4.10. Pico de escape del argón para un potencial $\Delta\text{VGEM}=240\text{V}$ con una resolución de energía de 52.6 %. . . . .	44
4.11. Pico para $^{55}\text{Fe}$ de 5.9keV $\Delta\text{VGEM}=240\text{V}$ con una resolución de energía de 29.4 %. . . . .	45
4.12. Función de resolución espacial para un ánodo segmentado en 2. . . . .	46
4.13. Señal directa del osciloscopio. . . . .	48
4.14. Corriente para $\Delta\text{VGEM}=260\text{V}$ en función del tiempo. . . . .	49
4.15. Corriente para $\Delta\text{VGEM}=256\text{V}$ en función del tiempo. . . . .	49

4.16. Corriente para $\Delta VGEM=252V$ en función del tiempo. . . . .	50
4.17. Corriente para $\Delta VGEM=246V$ en función del tiempo. . . . .	50
4.18. Corriente para $\Delta VGEM=240V$ en función del tiempo. . . . .	51
4.19. Ganancia en función de la diferencia de potencial de multiplicación $\Delta VGEM$ . . . . .	52
4.20. Conteos en función de la actividad de la fuente. Los datos fueron tomados cada uno en un intervalo de tiempo de 10 minutos con potencial de multiplicación $\Delta VGEM=250V$ . . . . .	53
4.21. Fondo de muones resultantes de rayos cósmicos $\Delta VGEM=250V$ . . . . .	54
5.1. Estructura simulada de una cámara de ionización TGEM. . . . .	56
5.2. (a) Simulación de los vectores de campo eléctrico. (b) Simulación de líneas equipotenciales. . . . .	57
5.3. Simulación de la norma del campo eléctrico en las diferentes secciones de la cámara de ionización. . . . .	58
5.4. Simulación de las líneas de campo eléctrico al interior de la cámara de ionización. . . . .	59
5.5. (a) Simulación de la avalancha a partir de un electrón con $\Delta VGEM =$ 400 V. (b) Simulación de la señal colectada con $\Delta VGEM = 400$ V. . . . .	60
5.6. Ganancia determinada a partir de los datos de la simulación. . . . .	60

---

# Índice de cuadros

2.1.	W: Energía perdida por la partícula incidente en cada producción de un par ion-electrón, taza de energía perdida por unidad de longitud . . . . .	19
2.2.	Valores numéricos de A y B. Tomados de [15]. . . . .	21

---

# Capítulo 1

## Introducción

En el estudio de la física de altas energías, las interacciones entre partículas son la fuente fundamental de información acerca de las propiedades físicas de las mismas, de este modo el estudio de los productos de interacción ligado inequivocamente a su detección forma el camino obligatorio que ha de ser recorrido para reconstruir a partir de datos experimentales la naturaleza de las partículas iniciales.

Uno de los ejemplos más importantes y de vanguardia de interacciones entre partículas se presenta en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) donde la colisión de grupos de protones a muy altas energías de centro de masa produce una gran cantidad de productos los cuales poseen propiedades físicas susceptibles de ser medidas con diversos tipos de detectores como calorímetros, detectores de semiconductor y cámaras de ionización, las propiedades físicas de estos productos se hacen evidentes al someterlos a nuevas interacciones con el medio en el cual transcurre su existencia, estas interacciones mecánicas o electromagnéticas permiten medir propiedades como energía, sección transversal, momento magnético y carga eléctrica entre otras.

En los experimentos desarrollados durante los últimos años en el LHC la detección y rastreo de muones producto de las colisiones proton-proton se ha desarrollado por medio de cámaras proporcionales multialambre (MWPC), la principal forma de interacción de los muones con el medio sensible es a través de ionizaciones, estas se pueden producir en diferentes materiales como sólidos, líquidos y gases; la MWPC es un detector cuyo medio sensible para la detección es un gas o mezclas de diferentes gases, con la ayuda de campos eléctricos al interior del gas se logra que el par electrón-ion

que se forma por causa del muón se mueva al interior de la cámara y dependiendo de la intensidad del campo eléctrico se logra que el par inicial se multiplique en regiones con intensos campos eléctricos como en la cercanía de un alambre, este tipo de señales se recogen y cuantifican para determinar tanto el paso de una partícula a través de la cámara como la energía depositada y el tiempo que requiere la cámara para tomar otra medida. La MWPC posee características como proporcionalidad, aceptable resolución espacial y buena resolución temporal. Sin embargo su fragilidad hace que su manipulación a grandes escalas plantea dificultades logísticas, que pueden ser minimizadas con la implementación de un nuevo tipo de detector que iguale o supere las especificaciones de la MWPC. Con este fin Fabio Sauli en 1996 [1] lanzó una nueva propuesta para detectores de gas llamados los Gas Electron Multiplier (GEM), donde se reemplazan multialambres por multimicroperforaciones. Los GEM reunen las características de las MWPC mejorando resolución espacial, temporal y añadiendo integridad estructural y menores efectos de deterioro del gas.

Los detectores dotados con tecnología GEM aprovechan grandes campos eléctricos, generados por la cercanía de electrodos y los efectos de borde producto de la geometría de las micro perforaciones para crear avalachas exponenciales que igualan y mejoran las generadas por la MWPC y gracias a su mayor integridad estructural permiten la construcción de detectores con grandes áreas sensibles fáciles de producir y manipular.

## 1.1. Estado del arte

La necesidad de estudiar las características propias de las partículas, conduce al desarrollo de tecnología capaz de interactuar en forma predecible y medible ante la presencia de estas. Dada esta condición, se aprovechan las características de los gases, en los cuales sus moléculas pueden ser ionizadas al interactuar con diferentes tipos de partículas. Los pares ion-electrón generados por la partícula incidente son guiados a través del gas con ayuda de un campo eléctrico y colectados en un electrodo para su cuantificación.

Con la anterior idea se han desarrollado diversos tipos de detectores de partículas empleando como medio sensible un gas. Entre los principales desarrollos se cuenta primero la invención del contador proporcional (single-wire proportional counter SWPC)[2] de-

sarrollado por Thomas, Rutherford y Geiger en 1908. La característica de este tipo de detectores de partículas es la resolución de energía, que permite diferenciar la energía de la partícula incidente. El desarrollo posterior de mayor importancia está ligado a la resolución espacial, En 1968 Georges Charpak propuso el empleo de un arreglo de alambres paralelos donde cada uno se comporta como un SWPC. Este tipo de detector se conoce como cámara multialambre (multi-wire proportional counter MWPC)[2]. En este detector se fusionan dos características esenciales, la resolución de energía y la resolución espacial.

Tras el desarrollo de Charpak por el cual fué galardonado con el premio Nobel de Física de 1992, el desarrollo de una nueva generación de detectores sensibles a la posición se ha visto impulsado, con el objetivo fijo de mejorar la resolución espacial, conservando o mejorando la resolución de energía y tiempo Anton Oed en 1998 desarrolló lo que se conoce como detector de micro cintas (micro-strip gas chamber MSGC)[2], simultáneamente se desarrollaba el detector MicroMegas[2], el cual consiste en una fina malla metálica que produce multiplicación de carga al generar un gran campo eléctrico entre la malla y el electrodo de lectura. Posteriormente se desarrollaron los detectores de placa resistiva (resistive plate chamber RPC) en los cuales grandes campos eléctricos son creados entre dos placas de materiales altamente resistivos. Los electrones creados al interior de estas placas son colectados por un electrodo de lectura fuera de las placas resitivas. Los anteriores son los principales desarrollos que se han presentado en el área de detectores de partículas teniendo gas como volumen sensible.

El detector (gas electron multiplier) GEM fue desarrollado por Fabio Sauli en 1996 en los laboratorios del CERN. La primera publicación fue en 1997. Un detector GEM consiste en un arreglo de placas paralelas. En medio de estas placas se introduce una placa multiplicadora de electrones (GEMfoil), la cual consiste en una delgada lámina de material aislante Kapton de  $50\ \mu\text{m}$  de espesor, en cuyas caras se adhieren delgadas placas de cobre de  $5\ \mu\text{m}$  de espesor. En esta placa multiplicadora se practican químicamente una gran cantidad de agujeros como se muestra en la figura 1.1.

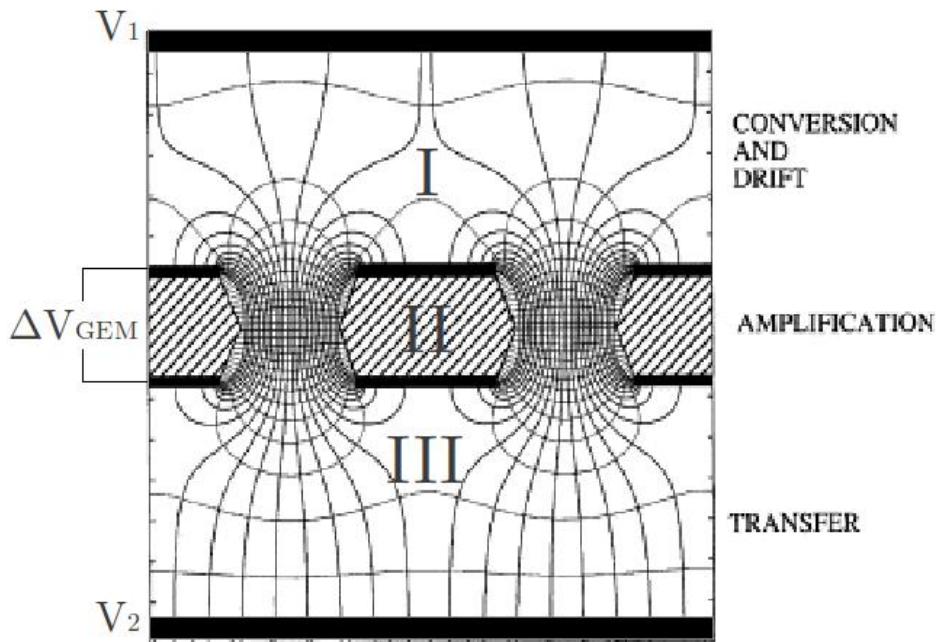


Figura 1.1: Zonas de la cámara de ionización GEM. Tomada de [3]

Al establecer diferencias de potencial entre las varias placas que conforman el detector, se pueden generar campos eléctricos en las tres regiones señaladas en la figura 1.1. En la región I se produce campo eléctrico de deriva el cual se encarga únicamente de movilizar los electrones entre la región II y la placa de mayor potencial sin producir ionizaciones secundarias. En la region II es donde la multiplicación ocurre. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre las placas del GEM foil  $\Delta V_{GEM}$  se producen campos eléctricos, cuyas líneas se curvan en dirección al interior de los agujeros produciendo un aumento en la intensidad del campo al interior del mismo. Los electrones guiados por la líneas de campo ingresan en la region II, donde la intensidad del campo es lo suficientemente grande para proveer a los electrones de la energía necesaria en su camino libre medio para generar ionizaciones secundarias y de esta manera producir la multiplicación de electrones. Finalmente el campo de deriva de la region III guía a los electrones al electrodo de lectura donde la señal es recolectada.

Una gran cantidad de publicaciones y trabajos se han desarrollado a partir de la idea inicial de F. Sauli. Estudios acerca del deterioro de las mezclas de gases se desarrollan en

[4] y [5], donde se muestra que con la implementación de placas multiplicadoras GEM en detectores gaseosos, se disminuye notablemente el deterioro presentado por el gas después de largos períodos de exposición a diversos tipos de radiación. Nuevos métodos de fabricación en masa son desarrollados en [6], [8] y [9]. Los desempeños de estos nuevos diseños son comparados con los desarrollados en CERN presentando resultados satisfactorios con métodos de fabricación más eficientes. Por último la implementación de las placas multiplicadoras en experimentos encaminados a la detección de materia oscura y partículas de supersimetría son propuestos en [10] y [11], donde la ganancia proporcionada por las placas multiplicadoras GEM garantiza un bajo ruido y una mejorada resolución espacial y temporal.

Muchas más aplicaciones pueden encontrarse documentadas en el sitio web del laboratorio CERN [12].

## 1.2. Motivación

El mayor objetivo de la colaboración GEM del experimento CMS en el diseño del sistema de muones es detectar muones originados desde todas las posibles fuentes del modelo estandar y aquellos enmarcados en la nueva física. Con este proposito se abre la posibilidad de llevar a cabo actualizaciones al sistema de muones que corresponden a la instalación de cámaras triple GEM en arreglo de supercámaras en las regiones frontales de CMS, en el rango de pseudorapidez de  $1,5 < |\eta| < 2,4$ , esto con el fin de mejorar la resolución espacial y temporal en esta región y obtener una mejora en la resolución del momento de los muones.[13]

Enmarcado en este objetivo, la Universidad de los Andes siendo miembro activo del CMS, participa en la colaboración con estudiantes doctorales desarrollando trabajos de simulación y análisis de datos del sistema de rastreo de muones.

De acuerdo con los objetivos del CMS GEM Collaboration, el presente trabajo se enfoca en el estudio del prototipo 1.0 de cámara de ionización Triple GEM presente en el laboratorio de altas energías de la Universidad de los Andes, esto con fin de establecer la primera referencia para futuras investigaciones y aplicaciones de los detectores Triple GEM en la Universidad de los Andes.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Ensamblar y caracterizar una cámara de ionización Triple GEM a partir de muones resultantes de rayos cósmicos, y comparar su desempeño con simulaciones desarrolladas a partir de software especializado Garfield 7.44 [14].

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Ensamblar y poner en funcionamiento la cámara de ionización Triple-GEM presente en el laboratorio de altas energías de la Universidad de los Andes.
- Obtener los espectros de muestras radioactivas conocidas para determinar el funcionamiento de la cámara de ionización.
- Determinar experimentalmente la ganancia, resolución de energía y la resolución espacial.
- Elaborar simulaciones que reproduzcan los resultados experimentales y corroboren el funcionamiento de la cámara de ionización.

---

# Capítulo 2

## Marco Teórico

En este capítulo, se expone la teoría relacionada directamente con los detectores gaseosos en los cuales se encuentra enmarcado el detector TGEM (Triple GEM). Se especifica la forma en que los diferentes tipos de radiación interactúan con el volumen sensible del detector y la forma como se produce la multiplicación de electrones, la cual es la razón de ser primordial de la tecnología GEM.

### 2.1. Detectores Gaseosos

Radiación ionizante como  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  al atravesar un gas puede ionizar las moléculas de éste produciendo uno o varios pares electrón-ion. La cantidad de pares electrón-ion depende de la energía de la partícula incidente y de la energía de ionización de las moléculas del gas. Aplicando un campo eléctrico externo con ayuda de un par de electrodos se consigue que los electrones y los iones se muevan en direcciones contrarias. La acumulación de cargas produce variaciones en el campo eléctrico externo que pueden ser detectadas en forma de una corriente o una variación en la diferencia de potencial. De la misma manera, si las cargas producto de las ionizaciones son capturadas en los electrodos antes de la recombinación, producen corrientes y variaciones en la diferencia de potencial que pueden ser detectadas con electrónica adecuada.

### 2.1.1. Interacción de Partículas Cargadas Relativistas con Materia

Las partículas interactúan con la materia generando ionizaciones o excitaciones en las moléculas que la componen. Estas ionizaciones o excitaciones se deben a la pérdida de energía que sufre la partícula incidente en el medio. Para partículas cargadas relativistas la fórmula de Bethe-Bloch[15] determina el diferencial promedio de energía perdida en un diferencial de distancia,  $-\frac{dE}{dx}$ .

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (2.1)$$

Donde  $A$  es la masa atómica de las moléculas del medio,  $\frac{K}{A} = 0,307 MeV g^{-1} cm^2$  para  $A = 1 g mol^{-1}$ ,  $Z$  es el número atómico del medio,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $m_e$  es la masa del electrón,  $\gamma$  es el factor relativista,  $\delta$  es la corrección sobre la ionización debida a efectos de la densidad,  $T_{max}$  es la máxima energía cinética que puede absorber un electrón en una colisión directa con la partícula ionizante e  $I$  es el potencial de ionización del medio. La figura 2.1 muestra la perdida de energía en función de la energía inicial de la partícula incidente para diferentes medios.[15]

### 2.1.2. Interacción de Fotones con Materia

Para fotones existen tres formas de interacción primordiales: El efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la formación de pares. Estas interacciones tienen diferentes energías mínimas y regiones de máxima sección transversal para diferentes materiales. La figura 2.2 muestra las secciones transversales de estas interacciones para carbono y plomo.[15]

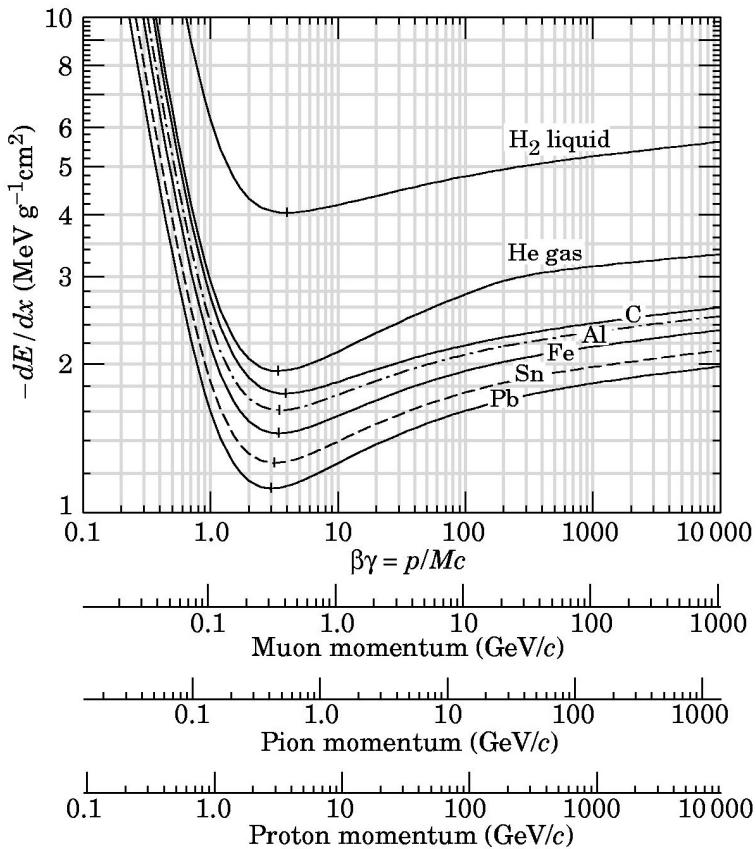


Figura 2.1: Tasa de energía perdida para diferentes partículas en diferentes medios.  
Tomada de [15]

Durante el desarrollo de este trabajo, se ha empleado la fuente de fotones  $^{55}\text{Fe}$  la cual emite fotones de 5.9 keV, los cuales se encuentran ubicados en la región donde predomina el efecto fotoeléctrico, ver figura 2.2.

### Efecto Fotoeléctrico

Explicado originalmente por Einstein, el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones desde un material al ser iluminado. Este tipo de proceso no depende de la intensidad luminosa sino de la frecuencia de la luz; es decir si la frecuencia del haz luminoso no supera un valor mínimo no hay emisión de electrones. La explicación de este fenómeno radica en la interpretación de que la energía de la luz incidente es transferida a la materia en cuantos de energía  $h\nu$ , donde  $h$  corresponde a la constante de Planck y  $\nu$  corresponde a la frecuencia de la luz incidente.

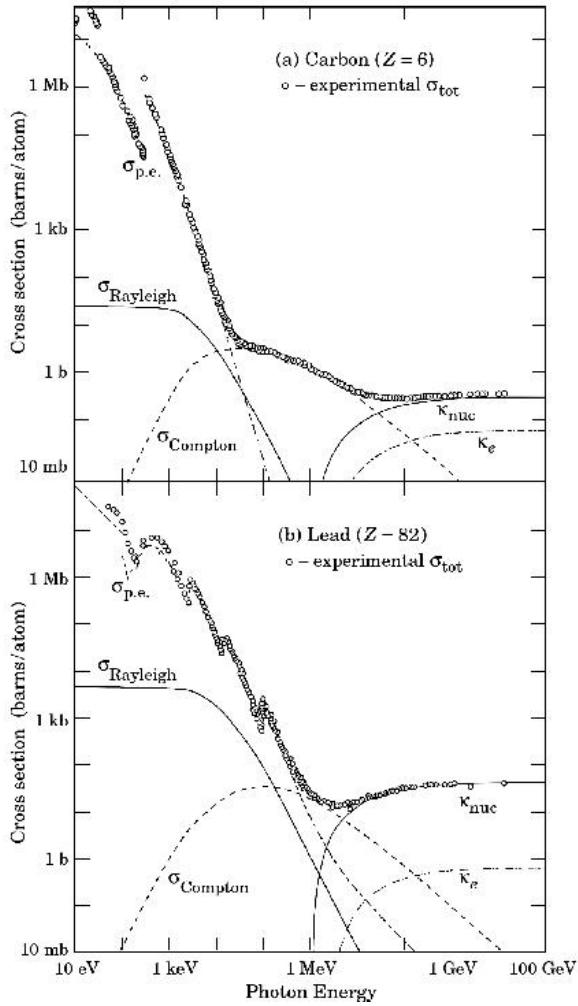


Figura 2.2: Sección transversal como función de la energía para Carbono y Plomo. Tomada de [15]

Con el fin de lograr una ionización de uno de los átomos del material en el cual incide la luz, la energía del fotón incidente debe ser igual o superior a la energía de enlace del electrón.

$$E_\gamma \geq E_{\text{Enlace}} \quad (2.2)$$

Teniendo en cuenta que la mayoría de veces la energía del fotón es mayor que la energía de enlace de los electrones, la energía restante queda en forma de energía cinética del electrón libre. Además el efecto fotoeléctrico se presenta en forma predominante sobre los electrones del orbital K y teniendo en cuenta que la masa de los átomos ionizados es mucho más grande que la energía del fotón, entonces la energía del electrón emitido es aproximadamente:

$$E_e = h\nu - E_{EnlaceK} \quad (2.3)$$

Al ser emitido un electrón del orbital K queda una vacancia que puede ser llenada por electrones de los orbitales superiores, proceso en el cual se emite un fotón con energía igual a la diferencia de la energía de enlace entre los orbitales  $\Delta E$ . Este tipo de fotones también puede ionizar uno de los electrones del orbital K, a este tipo de efecto se le denomina efecto Auger. Sin embargo la probabilidad de detectar este tipo de fenómeno es muy baja y no será tenida en cuenta en adelante. Una descripción más detallada se puede encontrar en [15].

### 2.1.3. Interacción de Electrones con Materia

La forma cómo un electrón interactúa con la materia circundante depende en gran medida de su energía. En la figura 2.3 se presentan los principales modos de interacción y al mismo tiempo la prevalencia de la ionización como principal medio de ceder energía al medio.

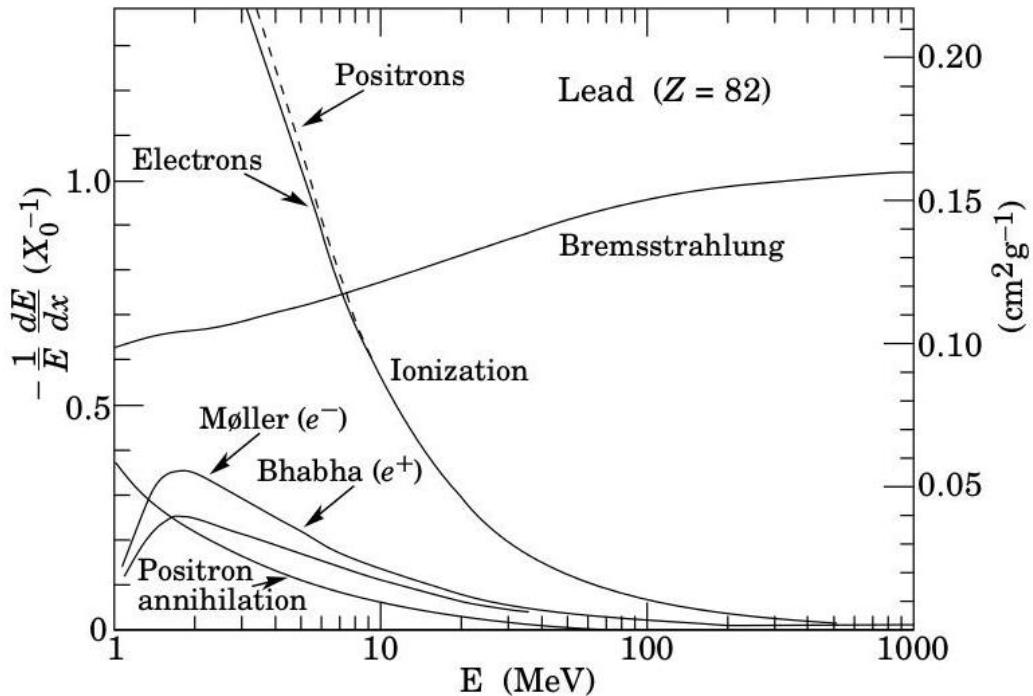


Figura 2.3: Razón entre la taza de energía perdida por unidad de longitud y por unidad de energía en función de la energía incidente. Tomada de [15]

En el proceso de ionización la energía del electrón incidente  $E_e$  es cedida a electrones en los orbitales superiores, logrando de esta manera un grupo de electrones libres cuyo número es proporcional a la energía del electrón inicial. Los demás modos de interacción presentan una probabilidad baja comparada con la ionización, razón por la cual no se tendrán en cuenta en el desarrollo de este trabajo.

## 2.2. Producción de Pares Ion-Electrón

Sin importar la forma cómo la radiación interactúa con la materia (*gas en el volumen sensible de una cámara de ionización*), si su energía es la suficiente se pueden producir pares ion-electrón. Esta producción está fuertemente ligada a una cantidad importante denominada  $W$ , que da cuenta de la energía mínima que se requiere para formar un par ion-electrón. Esta cantidad varía dependiendo del medio de interacción. Sin embargo  $W$  varía para diferentes medios entre 25 eV a 45 eV. Con base en esta cantidad es posible determinar el número de pares que serán formados al paso de una partícula a través del medio. Para una partícula que deposita una cantidad de energía  $\Delta E$  la cantidad de pares producidos está dado por:

$$N = \frac{\Delta E}{W} \quad (2.4)$$

Los valores de  $W$  para el argón y el dioxido de carbono se listan en la tabla 2.1, en la cual se observa que  $W_{Ar}$  es más pequeño que el del  $CO_2$ . Además los diferentes grados de libertad del  $CO_2$  hacen que la probabilidad de ionización se reduzca por esta razón la mayor cantidad de electrones de ionización se debe al  $Ar$ .

Gas	$W$ (eV/parIon-Electrón)	$\frac{dE}{dx}$ (keV/cm)
Ar	26	2.44
$CO_2$	33	3.01

Cuadro 2.1: W: Energía perdida por la partícula incidente en cada producción de un par ion-electrón, taza de energía perdida por unidad de longitud .

### 2.2.1. Movilidad de los Iones en Presencia de un Campo Eléctrico

En presencia de campos eléctricos, los iones se mueven en dirección del electrodo negativo a través de las líneas de campo. Los iones al ser mucho más masivos que los electrones tienen una velocidad mucho más baja que éstos y debido a las múltiples colisiones mantienen una velocidad aproximadamente constante. La distribución de los iones a lo largo de la trayectoria está dada por una distribución gaussina de la forma

$$dN = \frac{N}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-(x-tv_d)^2/4Dt} dx \quad (2.5)$$

donde  $v_d$  es la velocidad de deriva de los iones,  $D$  es el coeficiente de difusión y  $t$  el tiempo que demora la nube de iones en alcanzar el electrodo negativo. La velocidad de deriva de los iones en un campo eléctrico es proporcional a la razón entre magnitud del campo eléctrico aplicado y la presión del gas

$$v_d = \mu_+ \frac{E}{P} \quad (2.6)$$

donde  $E$  representa la magnitud del campo eléctrico aplicado,  $P$  es la presión del gas y  $\mu_+$  es la movilidad de los iones en el gas.

### 2.2.2. Movilidad de los Electrones en Presencia de un Campo Eléctrico

Los electrones en presencia de un campo eléctrico al contrario de los iones, son rápidamente acelerados entre colisiones debido a su poca masa. Esto hace que los electrones ganen más y más energía conforme siguen la líneas de campo hacia el electrodo positivo. Debido a esto la energía media de los electrones aumenta y la distribución de energía no puede ser descrita por medio de la distribución de Maxwell. A través de las líneas de campo los electrones se mueven con una velocidad de deriva  $v_d$ , la cual usualmente es un orden de magnitud inferior a la velocidad térmica  $\bar{v}_e$ . La velocidad de deriva depende en forma aproximada de la magnitud del campo eléctrico aplicado  $E$ , esta dependencia está dada por

$$v_d = \frac{2eEl_{mt}}{3m_e\bar{v}_e} \quad (2.7)$$

donde  $l_{mt}$  es el momento medio transferido en la trayectoria de los electrones.[15]

### 2.2.3. Amplificación

Dado que un solo electrón o un número bajo de éstos producen señales muy débiles y difícilmente detectables, se hace necesario que los electrones producto de ionizaciones primarias produzcan nuevos pares ion-electrón, esto con el fin de lograr señales más fuertes en los sistemas de detección. Para este fin, los electrones son sometidos a la acción de campos eléctricos suficientemente fuertes, en los cuales los electrones producto de ionizaciones primarias adquieren suficiente energía durante su camino libre medio para producir nuevos pares ion-electrón. El número de ionizaciones por unidad de distancia está dado por el primer coeficiente Townsend  $\alpha$ , el cual es función de la presión del gas  $P$  y de la magnitud del campo eléctrico  $E$ .

$$\alpha = AP e^{\frac{-BP}{E}} \quad (2.8)$$

Los valores de A y B corresponden a constantes fenomenológicas que dependen de la naturaleza del gas.

Gas	A ( $Torr^{-1} cm^{-1}$ )	B (V $Torr^{-1} cm^{-1}$ )
Ar	14	180
$CO_2$	20	466

Cuadro 2.2: Valores numéricos de A y B. Tomados de [15].

Teniendo en cuenta que la cantidad de pares de ion-electrón creados por unidad de distancia están dados por:

$$\frac{dN}{dx} = \alpha N \quad (2.9)$$

Se puede determinar la ganancia en una distancia  $x$  dada por:

$$G = \frac{N}{N_0} \quad (2.10)$$

$$G = e^{\alpha x}, \quad (2.11)$$

donde  $N_0$  es el número inicial de electrones producto de ionizaciones primarias y  $x$  es el camino total recorrido durante la multiplicación. En el detector Triple-GEM la

multiplicación ocurre al interior de los agujeros de la placa multiplicadora y la distancia  $x$  recorrida durante la multiplicación es de  $60 \mu\text{m}$ .

#### 2.2.4. Mezcla de Gases (Quencher)

Dentro de un detector, en las regiones de multiplicación los pares ion-electrón se producen por múltiples choques entre los átomos o moléculas y los electrones de ionización que se ven acelerados dentro de un campo eléctrico. Sin embargo la ionización no es la única forma como un átomo interactúa con un electrón; también se pueden producir excitaciones. Los átomos, que se encuentren en estados excitados, pueden emitir un fotón para regresar a su estado base. Este fotón puede interactuar en cualquier región del detector generando nuevos electrones, los cuales generarían nuevas avalanchas. Este tipo de fenómeno conduce a una divergencia en la densidad de carga y en forma evidente destruye la proporcionalidad del detector.

Las moléculas poliatómicas tienen mayores grados de libertad y formas de interactuar con fotones producto de la excitación, los grados de libertad de rotación y vibración. Esto permite a las moléculas tomar la energía de los fotones y disiparla en forma que no afecte la proporcionalidad del detector.

---

# Capítulo 3

## Detector Triple GEM

El Gas Electron Multiplier GEM, como se ha explicado con anterioridad, consiste en una delgada capa de Kapton de  $50\mu m$  de espesor en cuyas caras se colocan delgadas capas de cobre de  $5\mu m$  de espesor. Este arreglo de placas delgadas es microperforado químicamente para producir el patrón hexagonal mostrado en la figura 3.1.

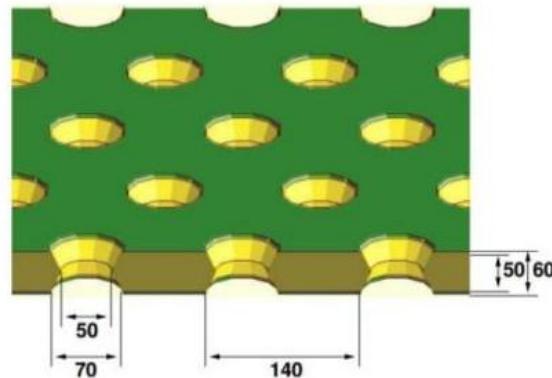


Figura 3.1: Geometría de una placa GEM (GEMfoil). Las medidas están en  $\mu m$ . Tomado de [10].

Un detector Triple GEM (TGEM) consiste en dos placas metálicas paralelas entre las cuales se introducen tres planos GEM (GEMfoil) como se muestra en la figura 3.2. Al establecer caídas de potencial para cada una de las regiones del detector se producen campos eléctricos tales que en las regiones de deriva, transferencia y colección solo se moviliza la carga a través de las líneas de campo eléctrico y en las regiones GEM 1, 2

y 3 se multiplica la carga en forma exponencial.

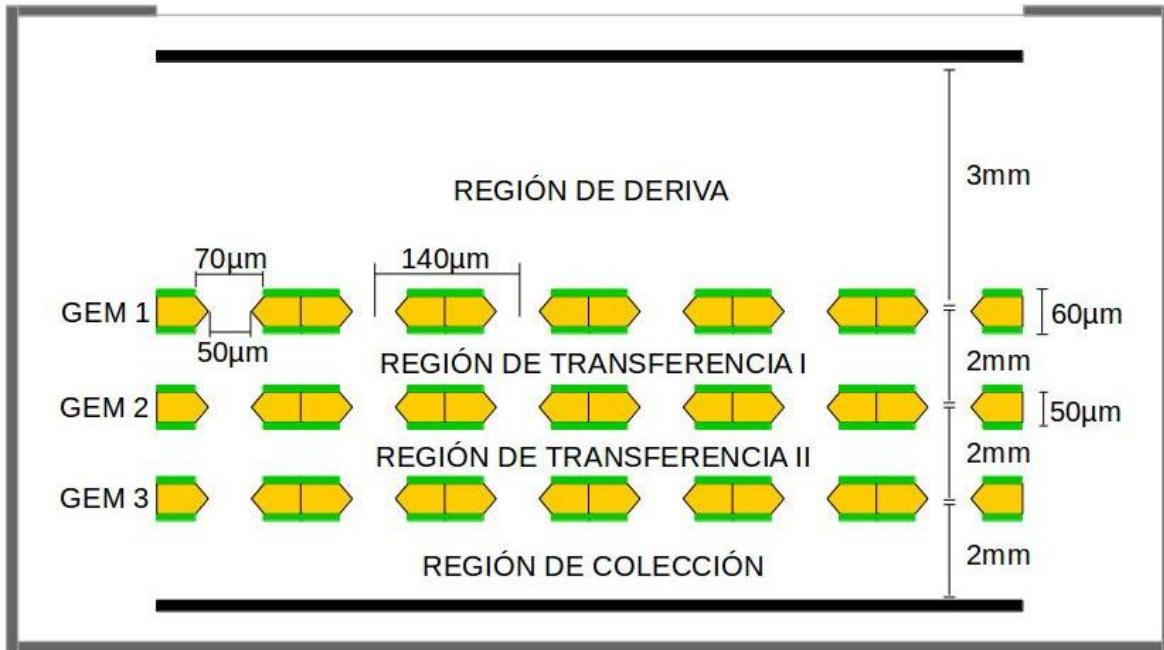


Figura 3.2: Estructura y regiones de un detector TGEM.

En este tipo de estructura se separan las regiones de multiplicación, lo cual reduce la probabilidad de descargas al limitar el campo eléctrico a un valor fijo y consecuentemente reduce el deterioro del gas. También separa las regiones de multiplicación de las regiones de colección de carga, permitiendo mayor libertad en el diseño del electrodo de lectura para pixelar su superficie y mejorar de esta manera la resolución espacial del detector.

### 3.1. Prototipo 1.0 Detector TGEM

El prototipo 1.0 de detector TGEM consiste en tres etapas de multiplicación con un área activa de  $100 \text{ cm}^2$ , un cátodo de la misma área y un ánodo segmentado de 256 canales de lectura. Toda la estructura interna se encuentra encerrada por un volumen hermético con una delgada ventana de kapton con la misma área de los GEMfoil. Las partes principales del detector venían acompañadas con empaques para realizar el sellado del detector, tornillos metálicos y plásticos para montar la estructura interna

y sellar la estructura externa. El ingreso y salida de la mezcla de gases se realiza por medio de dos conexiones rápidas de  $6mm$  que también se encontraban incluidas dentro de las partes.

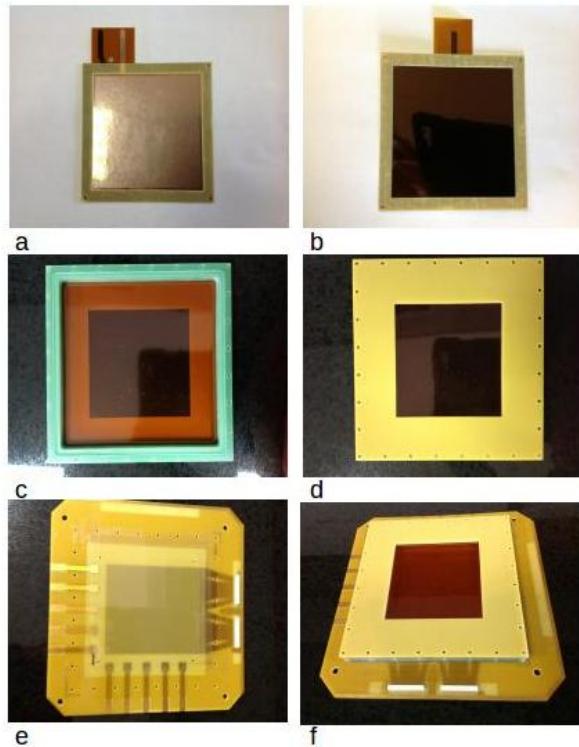


Figura 3.3: Partes del detector Triple GEM. a. GEM foil, b. Cátodo, c. Cuerpo del detector y ventana, d. Tapa superior y ventana, e. Ánodo segmentado con resolución espacial 1D, f. Estructura parcialmente ensamblada.

### 3.1.1. Modificaciones

Teniendo vital importancia la limpieza sobre cada una de las partes del prototipo, se realizaron modificaciones sobre el ánodo segmentado con el fin de evitar realizar soldaduras directas sobre los GEMfoils. Estas modificaciones consisten en pequeños cilindros y arandelas de cobre, sujetos por medio de un tornillo interno y una tuerca externa. Esta modificación permite sujetar los GEMfoils sin necesidad de soldarlos a la estructura, haciendo más fácil el proceso de ensamble y futuros cambios en los GEMfoils si llegare a ser necesario, figura 3.4.

También en la parte externa del ánodo se ubicaron los mismos sujetadores, con el

fin de realizar cambios rápidos de divisor de voltaje, para realizar estudios de ganancia en función de la diferencia de potencial de multiplicación.

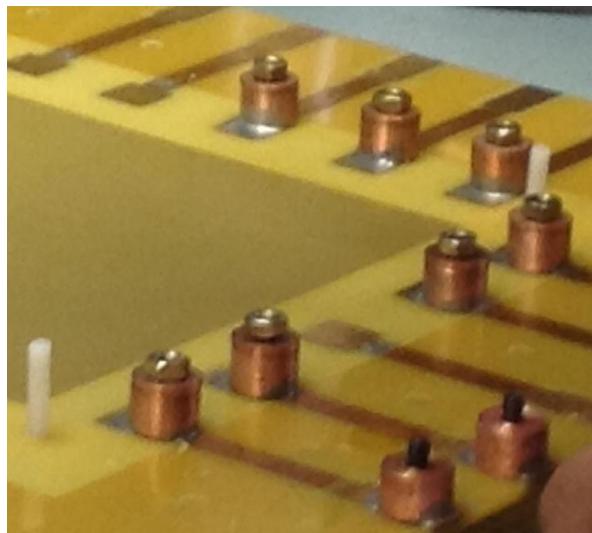
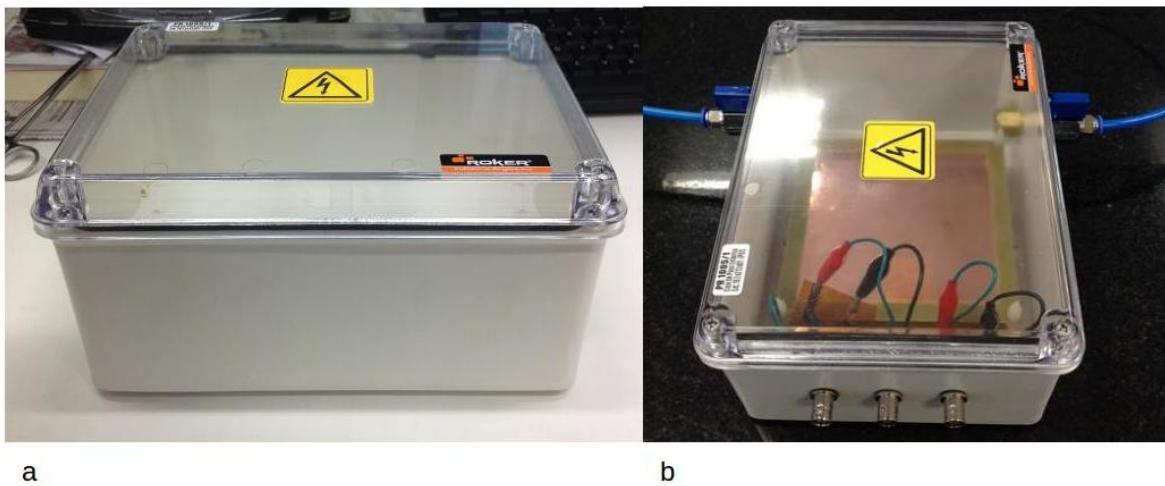


Figura 3.4: Modificaciones realizadas al ánodo. Sujetadores de presión para los GEMfoils y el Cátodo.

### 3.1.2. Almacenamiento y Pruebas de calidad

#### Almacenamiento

Reafirmando el hecho que la limpieza es de vital importancia al momento de desarrollar este tipo de trabajos, se establecieron protocolos para el almacenamiento de las partes más sensibles al polvo y la humedad, en este caso los GEMfoils. Para tal caso se diseñaron soportes de almacenamiento a medida, tomando como base una caja de paso estanca Roker norma IP 65, en cuyo interior se instalaron soportes con separadores de plástico, los cuales impedian el contacto de los GEMfoils con cualquier superficie. También en la caja de paso se instalaron válvulas para el ingreso de nitrógeno y terminales de alto voltaje sellados con empaques para conservar la norma internacional. En la figura 3.5 se observan con claridad cada una de las modificaciones y además los GEMfoil en su interior.



a

b

Figura 3.5: Modificaciones realizadas a la caja de paso estanca. a. Antes, b. Después.

### Pruebas de Calidad

Las pruebas de calidad que se realizaron sobre los GEMfoil corresponde a pruebas del alto voltaje para determinar la corriente de fuga. Esta corriente de fuga para los GEMfoils se debe encontrar al rededor de los 5 a 10  $nA$ . Para tal fin se mid  la caida de potencial sobre una resistencia de  $10 M\Omega$  conectada en serie a cada uno de los GEMfoils, un esquema de este montaje se ve en la figura 3.6.

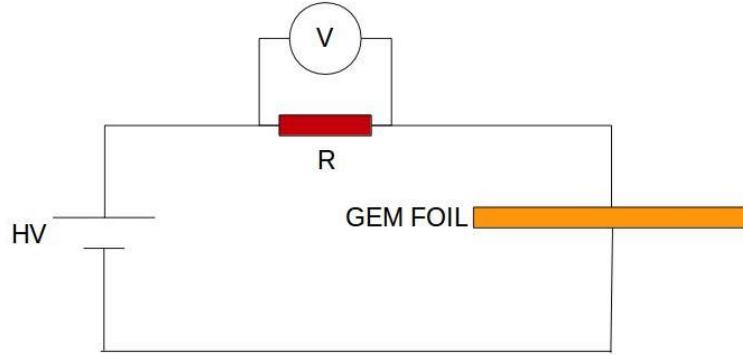


Figura 3.6: Esquema del circuito de prueba.

Las corrientes de fuga determinan el buen funcionamiento del detector y en forma específica, si son capaces de mantener la diferencia de potencial necesario para la multiplicación de electrones. En las figuras 3.7 a 3.9 se observan las corrientes de fuga obtenidas para el montaje experimental de la figura 3.6. En ellas se evidencia que

los tres GEMfoils se encuentran en condiciones funcionales y mantienen la diferencia de potencial. La incertidumbre en la corriente se calcula a partir de la resolución del aparato de medida, la cual se fija en  $1mV$  para el primer GEMfoil y en  $0.1mV$  para los otros dos. La precisión de la resistencia está dada por el 0.05 de su valor real, con lo cual se tiene un valor de  $10^5\Omega$ .

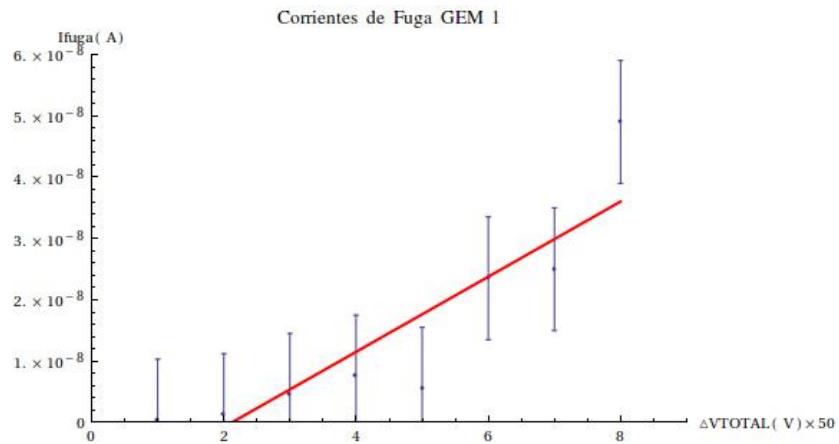


Figura 3.7: Corrientes de fuga GEM 1.

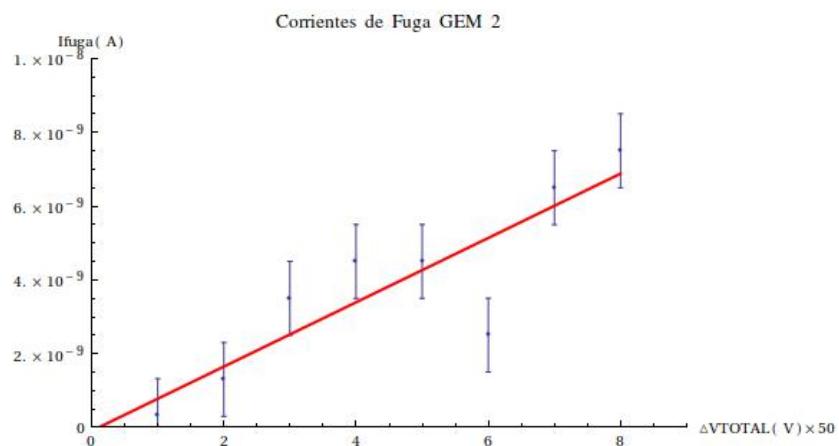


Figura 3.8: Corrientes de fuga GEM 2.

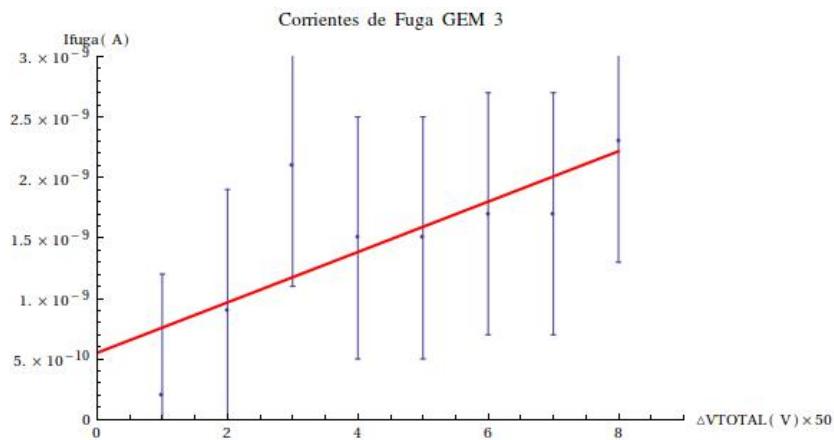


Figura 3.9: Corrientes de fuga GEM 3.

## 3.2. Ensamble

A continuación se listan cada uno de los componentes del detector necesarios para el ensamblaje del cuerpo principal. Además se describe paso a paso el proceso de ensamblaje y los componentes adicionales elaborados para su ensamblaje final.

### 3.2.1. Componentes Principales

Los componentes principales de cada detector TGEM se encuentran incluidos dentro del Kit que se obtiene directamente en el CERN. A continuación se escribe una lista de los componentes que deben estar presentes en dicho Kit por cada detector.

- 3 GEMfoil.
- 1 Drift.
- 1 Readout con 4 perforaciones para los tornillos plásticos y 2 a 4 conexiones de lectura.
- 28 Tornillos metálicos.
- 28 Tuercas metálicas.
- 4 Tornillos plásticos.
- 4 Tuercas plásticas.

- 44 Espaciadores plásticos de 0.5 mm de espesor.
- 2 Empaques (Oring).
- 2 Conexiones de gas con salida de 6 mm y rosca de ajuste.
- 1 Cuerpo de plástico con ranuras para los empaques, 28 perforaciones para los tornillos metálicos y 2 perforaciones mecanizadas (con rosca) para las conexiones de gas.
- 1 lámina de Kapton con 28 perforaciones para los tornillos metálicos.
- 1 Cubierta superior de plástico rígida con una perforación de  $10\text{ cm}^2$  en el centro y 28 perforaciones para los tornillos metálicos.

### 3.2.2. Ambiente Controlado (Sala Limpia)

Una vez verificada la cantidad de elementos se debe proceder al almacenamiento de las partes sensibles de detector (GEMfoils) al interior de un ambiente controlado, libre de humedad y de partículas que puedan afectar la integridad estructural de los mismos. Para tal fin se debe contar con acceso a una Sala Limpia categoría 1000.

El Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de los Andes cuenta con una Sala Limpia, en la cual uno de sus cuartos cuenta con tal categoría. En este espacio se almacenan y se desarrollan todas las manipulaciones referentes al ensamblaje del detector.

Es de vital importancia que los GEMfoils no se expongan a humedad, ni a partículas, ya que esto puede afectar en forma irreparable su integridad. Por esta razón los GEMfoils deben pasar directamente del empaque original al interior de la sala limpia en un soporte especialmente diseñado para evitar el contacto con cualquier superficie preferiblemente una Caja de Paso Estanca norma IP-65 acondicionada con soportes y separadores plásticos, ver figura 3.5.

### 3.2.3. Ensamble Principal

Una vez establecidas las distancias entre el Drift, los GEMfoils y el Readout (3mm, 2mm, 2mm, 2mm), ver figura 3.2, se ubican los tornillos de plástico a través del Readout

como se observa en la figura 3.10 (a).

Seguido a esto se ubican cada uno de los GEMfoils estableciendo las distancias con los separadores como se muestra en la figura 3.10 (b).

Teniendo en cuenta que la tarjeta de lectura, que se emplea en este ensamblaje, fué mod-

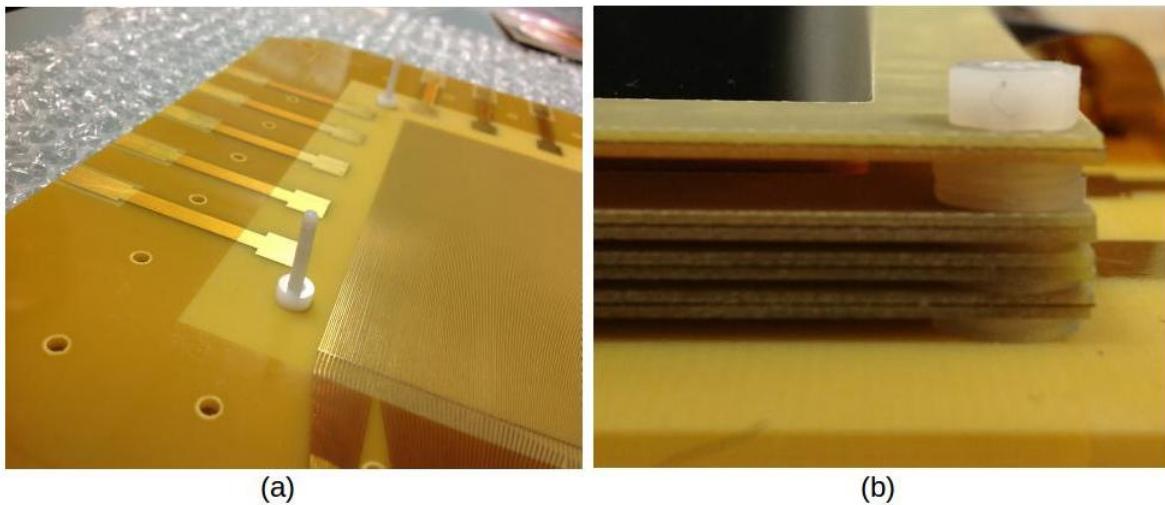


Figura 3.10: a) Tornillos plásticos sustento de los GEMfoil al interior del la cámara de ionización y separadores. b) Distancias establecidas con los separadores.

ificado con el fin de no soldar los GEMfoils a éste, el siguiente paso consiste en asegurar con las arandelas y tuercas las pestañas de los GEMfoil previamente cortadas al tamaño ideal, ver figura 3.11.

Después de conectar por medio de presión cada uno de los GEMfoils y el Drift a sus conexiones en la misma tarjeta de lectura, se procede al sellado de la cámara con ayuda de los empaques, el cuerpo de plástico, la lámina de Kapton, la cubierta superior y los 28 tornillos y tuercas metálicos, ver figura 3.12 (a) y (b).

Por último se procede a sellar el volumen sensible del detector, separandolo completamente del ambiente externo con ayuda de las conexiones de gas a 6mm, en las cuales se instalan válvulas dejandolo listo para ser removido de la Sala Limpia, ver figura 3.13.



Figura 3.11: Sujetadores en cobre.

Por último se procede a sellar el volumen sensible del detector, separandolo completamente del ambiente externo con ayuda de las conexiones de gas a 6mm, en las cuales se instalan válvulas dejandolo listo para ser removido de la Sala Limpia, ver figura 3.13.

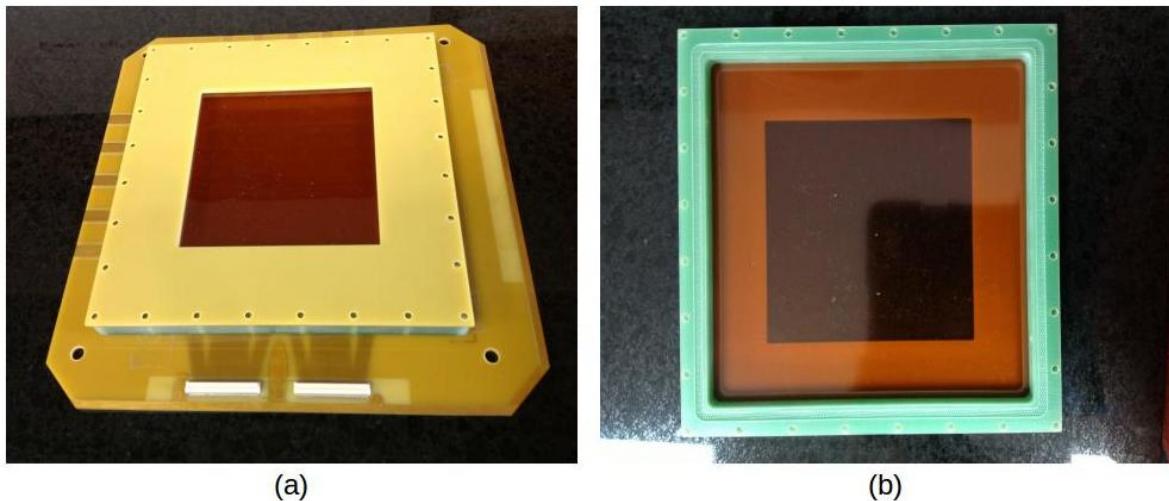


Figura 3.12: a) Volumen a punto de ser sellado con los tornillos. b) Cuerpo plástico donde se observa la ranura para el empaque, la cubierta superior y la lámina de Kapton.

Con el ensamblaje principal terminado se procede a diseñar y construir las partes necesarias para la puesta en marcha del detector Triple GEM.

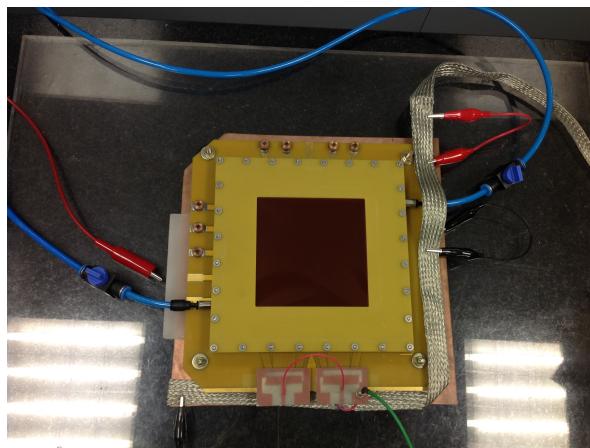


Figura 3.13: Ensamble final del cuerpo principal del detector.

### 3.2.4. Componentes Adicionales

Con el ensamble principal del detector no es suficiente para que éste funcione. Se hace necesario diseñar y construir componentes adicionales, los cuales se listan a continuación:

- Plano de Tierra
- Divisor de Voltaje
- Conexiones para la tarjeta de lectura

#### Plano de Tierra

Consiste en una placa de material conductor aterrizada a la tierra real de la electrónica necesaria para la lectura de la señal.

#### Divisor de Voltaje

El divisor de voltaje se compone de una cascada de resistencias, en las cuales el potencial total es dividido en potenciales específicos para cada región del detector. Este divisor de voltaje cuenta además con una resistencia de protección de  $10M\Omega$  para el Drift y cada GEMfoil, de esta manera se limita el flujo de corriente a través de los componentes primordiales del detector en caso de accidente.

Cabe señalar que el ensamble de los GEMfoils se realizó en forma contraria a lo que

generalmente se encuentra señalado en la literatura. Si se observa con detenimiento la figura 3.11 se puede ver que el conector de la parte superior de los GEMfoils se encuentra a la izquierda. Esto se hizo con el objeto de no tener que mover la conexión de gas que se puede observar a la izquierda de la figura 3.13. El diseño del divisor está acorde a este cambio.

Para el cálculo de las resistencias del divisor, se supone que la resistencia de equivalente que presentan los GEMfoils al paso de corriente es del orden de 50 a 100  $M\Omega$ , con lo cual la suma de resistencias en paralelo tiende al valor de la resistencia más pequeña. Un esquema del divisor de voltaje se puede ver en la figura 3.14 (a).

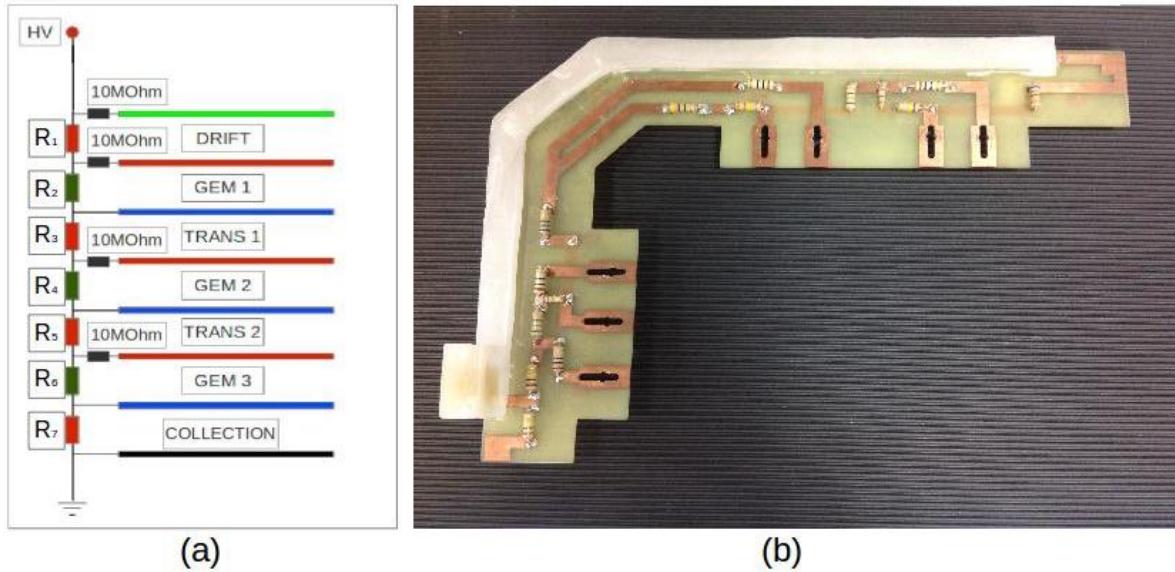


Figura 3.14: a) Esquema del divisor de voltaje. b) Divisor de voltaje diseñado con los terminales de los GEMfoils invertidos.

Teniendo en cuenta que las resistencias  $R_2$ ,  $R_4$  y  $R_6$  son de valores muy aproximados a las resistencias en paralelo con las resistencias GEM, la resistencia total del divisor de voltaje se calcula de la siguiente manera:

$$R_T = \sum R_i \quad (3.1)$$

También se sabe que la corriente que circula por el divisor de voltaje es una con-

stante, razón por la cual se pueden fijar los valores de  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  y  $R_7$  y los valores de  $V_{drift}$ ,  $V_{trans1}$ ,  $V_{trans2}$ ,  $V_{coll}$  y calcular los valores de  $R_2$ ,  $R_4$  y  $R_6$  de la siguiente manera:

$$R_2 = R_4 = R_6 = \frac{V_{gem}}{V_{drift}} R_1 = \frac{V_{gem}}{V_{trans}} R_3 \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2 se ha tenido en cuenta que  $V_{trans1} = V_{trans2} = V_{coll}$  y que  $R_3 = R_5 = R_7$ . De esta manera se calculan la resistencias para diferentes divisores de voltaje en los que se mantienen constantes los potenciales  $V_{drift}$ ,  $V_{trans1}$ ,  $V_{trans2}$ ,  $V_{coll}$  y se varían los potenciales  $V_{gem1}$ ,  $V_{gem2}$  y  $V_{gem3}$ .

Como se había señalado anteriormente, se llevaron a cabo modificaciones en el ánodo del detector, donde también se encuentran las conexiones de alto voltaje para los GEMfoils, si se observa con detalle la figura 3.13 se nota la presencia de sujetadores de cobre como los que se emplearon para conectar con presión los GEMfoils. Teniendo en cuenta esto y observando la figura 3.14 (b) se hace evidente la forma de conexión del divisor de voltaje.

Este tipo de conexión, en la cual ninguna resistencia se encuentra adherida a la base del detector, permite intercambiar con facilidad divisores de voltaje facilitando la modificación de los potenciales  $V_{gem1}$ ,  $V_{gem2}$  y  $V_{gem3}$  manteniendo constantes los potenciales  $V_{drift}$ ,  $V_{trans1}$ ,  $V_{trans2}$ ,  $V_{coll}$ .

### Conexiones para el Readout

Como se puede observar en la figura 3.10 (a), la señal del detector es recolectada por pequeñas cintas conductoras (strips), 256 en total. Estas cintas convergen a dos conexiones que se pueden observar en la figura 3.12 (a). La señal consiste en acumulaciones de carga que se traducen en una corriente, la cual al pasar a través de una resistencia y caer a tierra produce una diferencia de potencial.

En este trabajo, la señal que se obtiene proviene de todas las líneas de lectura unificadas en izquierda y derecha. El diseño de la conexión de lectura se muestra en la figura 3.15 (a) y su construcción en 3.15 (b).

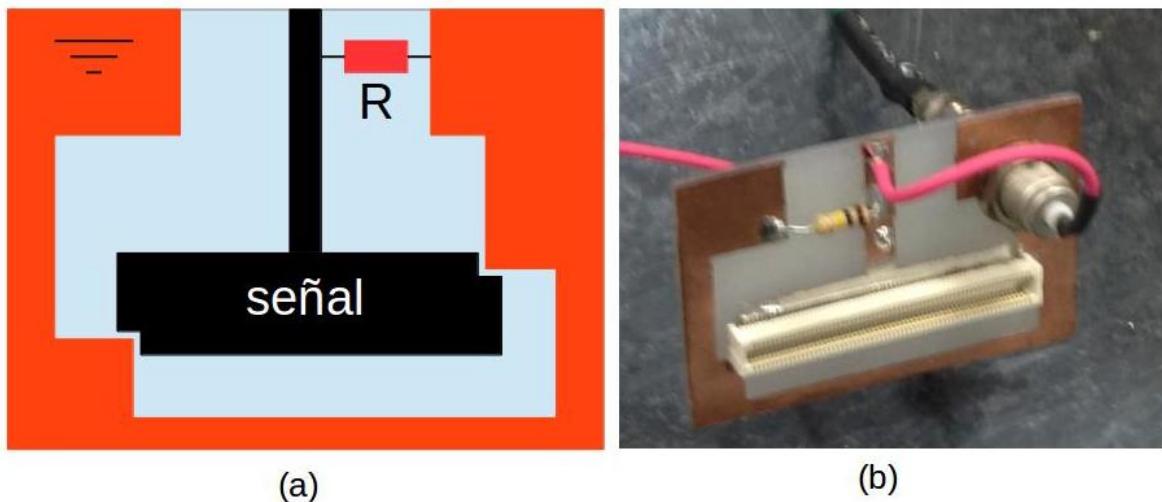


Figura 3.15: a) Esquema conector. b) Conector en modo de altura de pulso.

Una vez se obtiene la señal directa del detector se deben emplear componentes electrónicos como son:

- Preamplificador Ortec 113
- Amplificador Ortec 672
- Osciloscopio Tektronik
- MCA (Maestro)
- Discriminador
- Contador Dual Channel Scaler

Con estos implementos electrónicos y el detector debidamente ensamblado se puede obtener y procesar la señal procedente de diversas fuentes radioactivas.

### **Ensamble Final**

Después de cuidadosamente seguir los pasos expuestos, el ensamble final del detector triple GEM se puede observar en la figura 3.16.

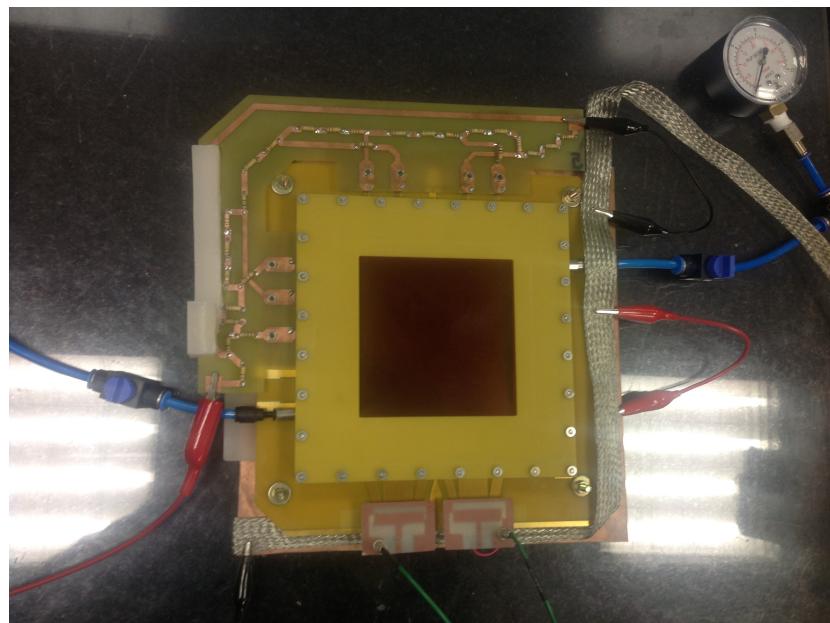


Figura 3.16: Ensamble final del detector TGEM.

---

# **Capítulo 4**

## **Caracterización**

En este capítulo se describen los procedimientos experimentales llevados a cabo para realizar la caracterización del detector TGEM. También se relacionan los implementos empleados durante la toma de datos y los resultados obtenidos que después de ser analizados permiten la caracterización del detector TGEM.

### **4.1. Implementos e Instrumentos de Medida**

Los implementos a continuación relacionados se emplearon para la obtención de datos necesarios para el cálculo de la ganancia en función de la diferencia de potencial, resolución de energía, resolución de tiempo, y medidas de resolución espacial.

- Osciloscópio Tektronix TDS 2022C.
- Preamplificador Ortec 113.
- Amplificador Ortec 672
- ASPEC MCA Ortec 927
- Dual Channel BCD Scaler Modelo 1880C
- Discriminador PS Modelo 710
- Fuente de Alto Voltaje PHYWE 0-10kV
- Mezcla de gases Ar 75 % y CO<sub>2</sub> 25 %

## 4.2. Resolución de Energía

Determinar la resolución de energía del detector TGEM es uno de los objetivos fundamentales de este trabajo. Para tal fin se emplea la fuente gamma  $^{55}\text{Fe}$  de  $25\ \mu\text{Ci}$  la cual emite fotones característicos de 5.9 keV. La caracterización de un detector se inicia con la toma de un espectro de energías pulse height (PH), para parámetros de potencial específicos como lo son las diferencias de potencial de multiplicación  $\Delta\text{VGEM}$ .

Como se ha mencionado, las conexiones de lectura se encuentran unificadas en izquierda y derecha. De esta manera la señal que se observa corresponde a todas las cargas recolectadas en una de las regiones del detector. Esta señal es filtrada a través del preamplificador Ortec 113, y enviada al Amplificador Ortec 672. Desde este punto la señal es enviada al MCA Ortec 927 y procesada mediante el Software Maestro 64, el resultado de este proceso se puede observar en la figura 4.1.

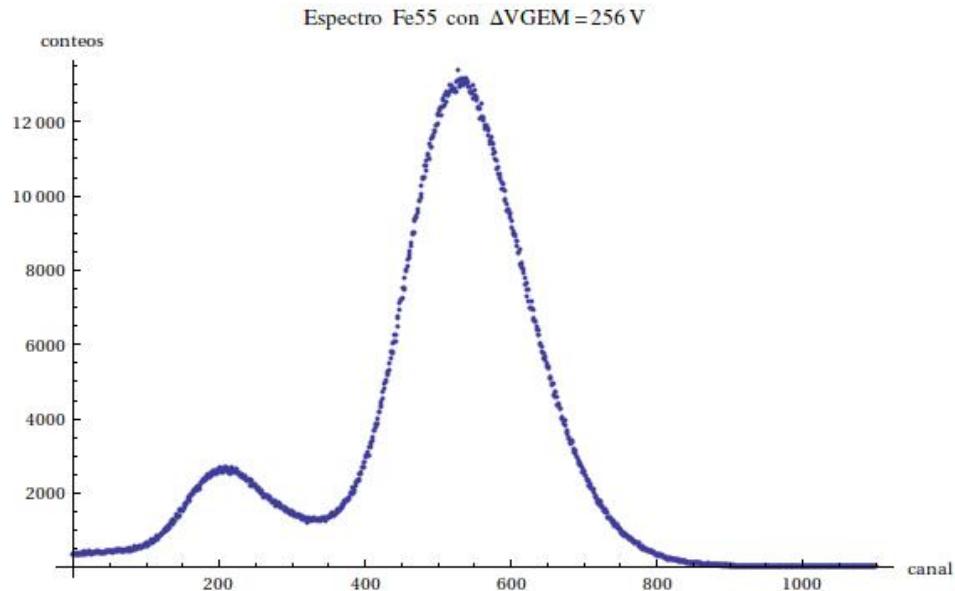


Figura 4.1: Espectro de la muestra de  $^{55}\text{Fe}$  tomada con  $\Delta\text{VGEM}=256\text{V}$ ,  $E_{drift}=1.2\text{kV/cm}$  y  $E_{trans}=E_{coll}=1.9\text{kV/cm}$ .

Este espectro corresponde a la muestra de  $^{55}\text{Fe}$  de  $25\mu\text{Ci}$ , la cual emite fotones de energía característica de 5.9 keV. El espectro de la figura 4.1 muestra un pico principal correspondiente a la energía característica del  $^{55}\text{Fe}$  y un pico secundario cerca del canal 200.

Los detectores, que tienen como medio sensible Argón, al ser expuestos a fuentes con energías mayores que la energía de ionización del orbital K (3.203keV), pueden presentar ionizaciones en sus orbitales internos. Las vacancias dejadas por estos electrones son rápidamente llenadas por electrones de orbitales superiores emitiendo de esta manera un foton con energía igual a la diferencia de energía entre los dos orbitales (2.9keV). En este proceso el fotón puede escapar del detector con lo cual habría una energía perdida igual a la energía de este fotón. Sin embargo la probabilidad de ser reabsorbido por el gas es aproximadamente del 85 %. Los fotones procedentes de la fuente de  $^{55}\text{Fe}$  continuarán generando ionizaciones, y mostrando la señal correspondiente al pico principal del espectro. Por su parte los fotones producto de la deexcitación de los átomos de Ar generan una señal más pequeña correspondiente a una energía de 3.2 keV y con menos frecuencia debido a su posibilidad de no ser reabsorbidos en el detector. De esta forma el espectro que se observa para la muestra de  $^{55}\text{Fe}$  siempre presenta dos picos: el pico propio del  $^{55}\text{Fe}$  y el pico de escape del Argón.

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a los espectros de los picos del  $^{55}\text{Fe}$  variando los potenciales de multiplicación, con una presión manométrica de 5mbar y una temperatura entre 16 a 18 °C.

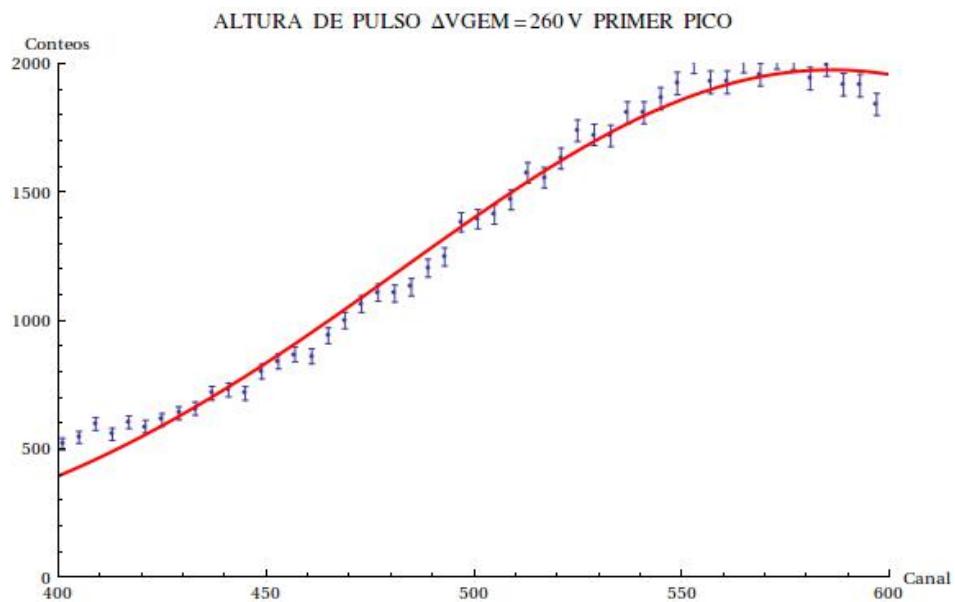


Figura 4.2: Pico de escape del argón para un potencial  $\Delta\text{VGEM}=260\text{V}$  con una resolución de energía de 41.6 %.

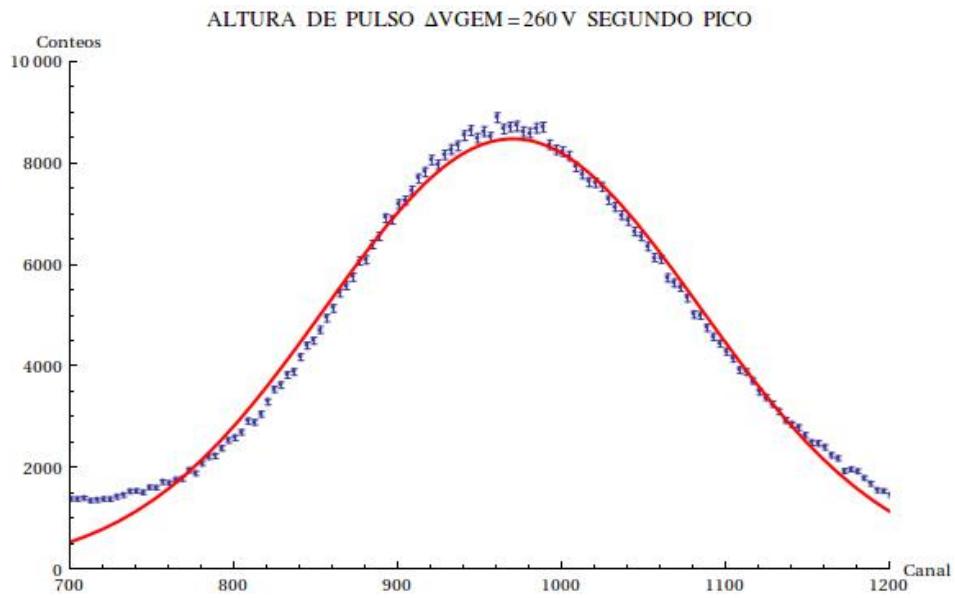


Figura 4.3: Pico para  $^{55}\text{Fe}$  de 5.9keV  $\Delta V_{GEM}=260\text{V}$  con una resolución de energía de 27.8 %.

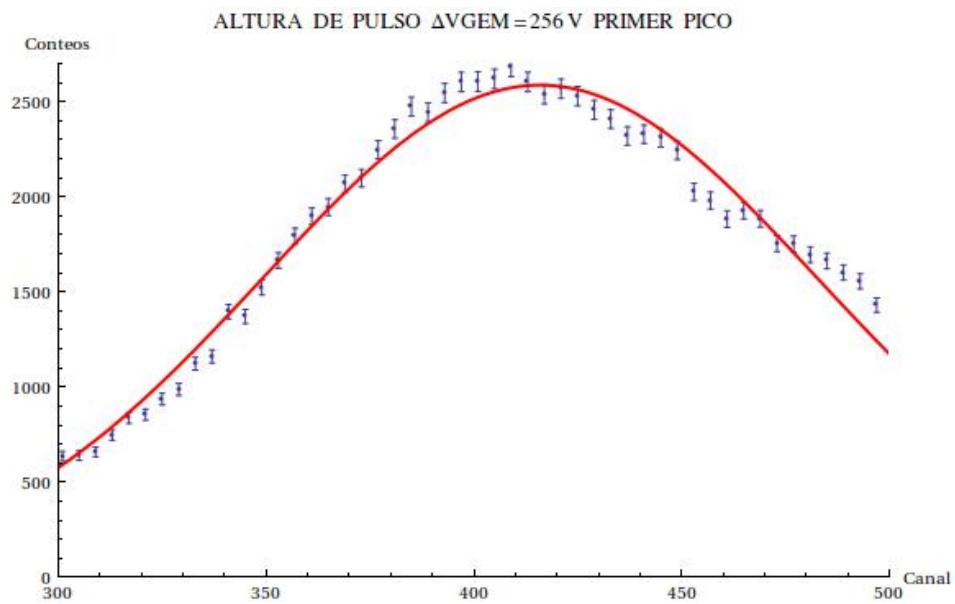


Figura 4.4: Pico de escape del argón para un potencial  $\Delta V_{GEM}=256\text{V}$  con una resolución de energía de 37.9 %.

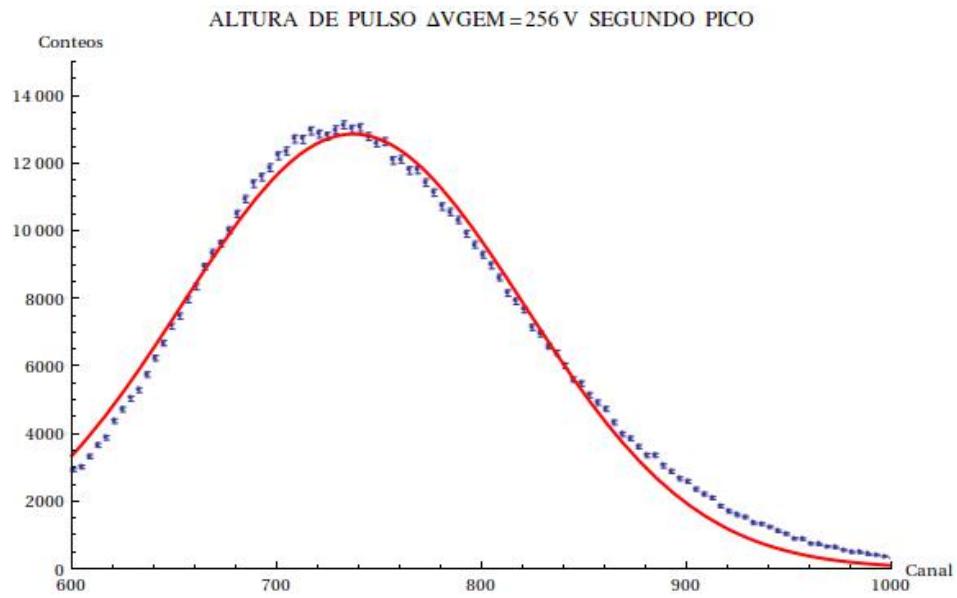


Figura 4.5: Pico para  $^{55}\text{Fe}$  de 5.9keV  $\Delta V_{GEM}=256\text{V}$  con una resolución de energía de 26.7 %.

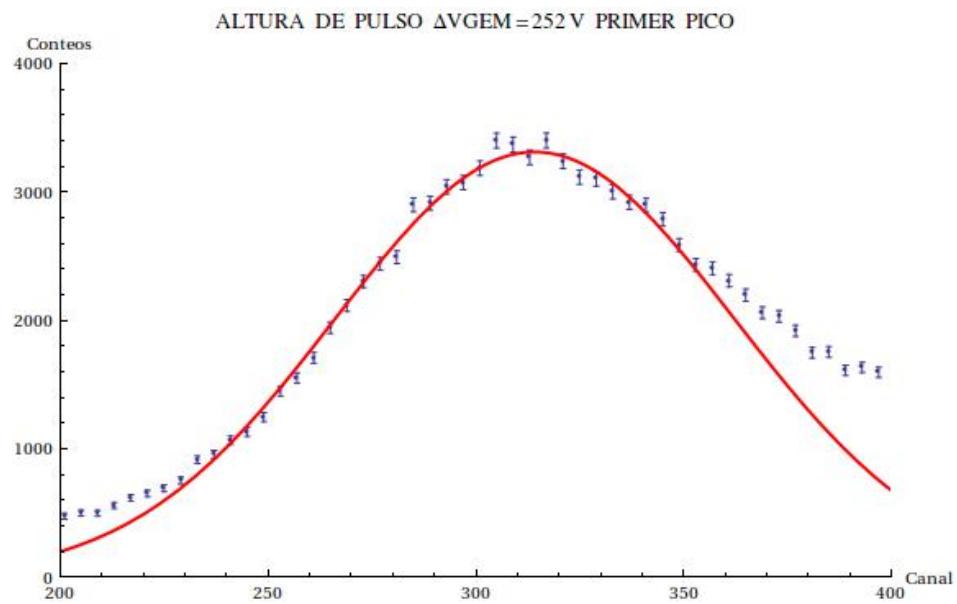


Figura 4.6: Pico de escape del argón para un potencial  $\Delta V_{GEM}=252\text{V}$  con una resolución de energía de 36.1 %.

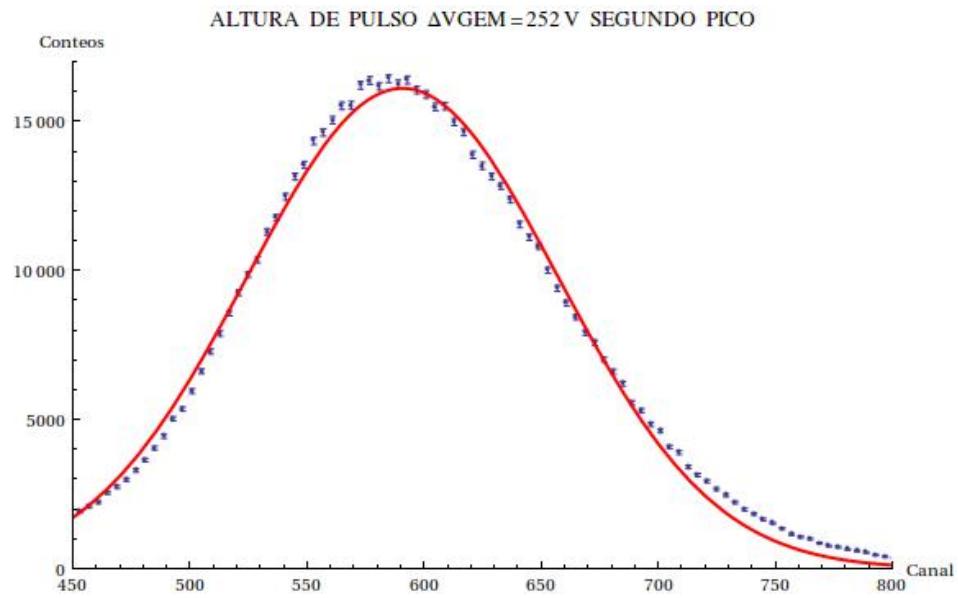


Figura 4.7: Pico para  $^{55}\text{Fe}$  de  $5.9\text{keV}$   $\Delta V_{GEM}=252\text{V}$  con una resolución de energía de 26.5 %.

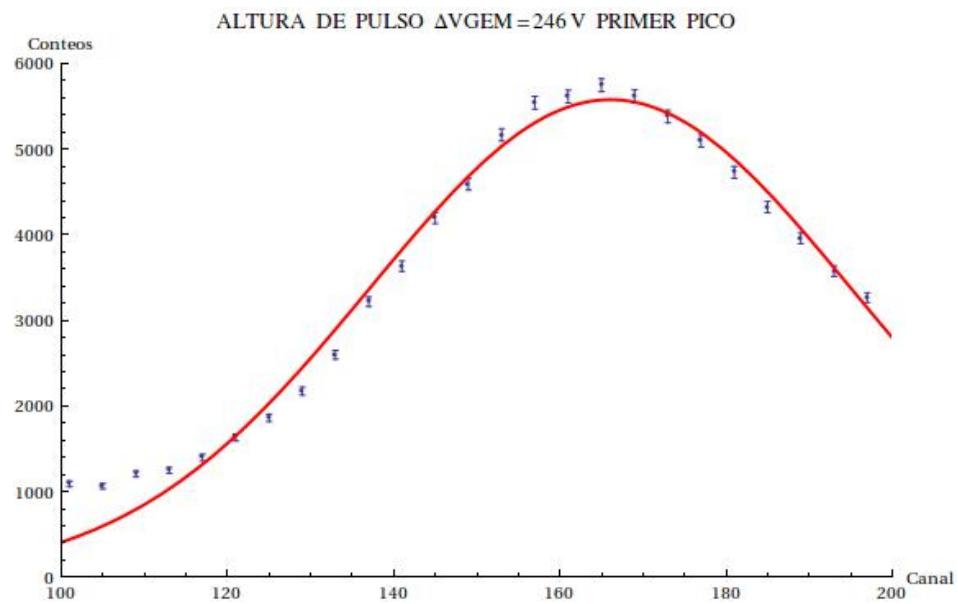


Figura 4.8: Pico de escape del argón para un potencial  $\Delta V_{GEM}=246\text{V}$  con una resolución de energía de 41.0 %.

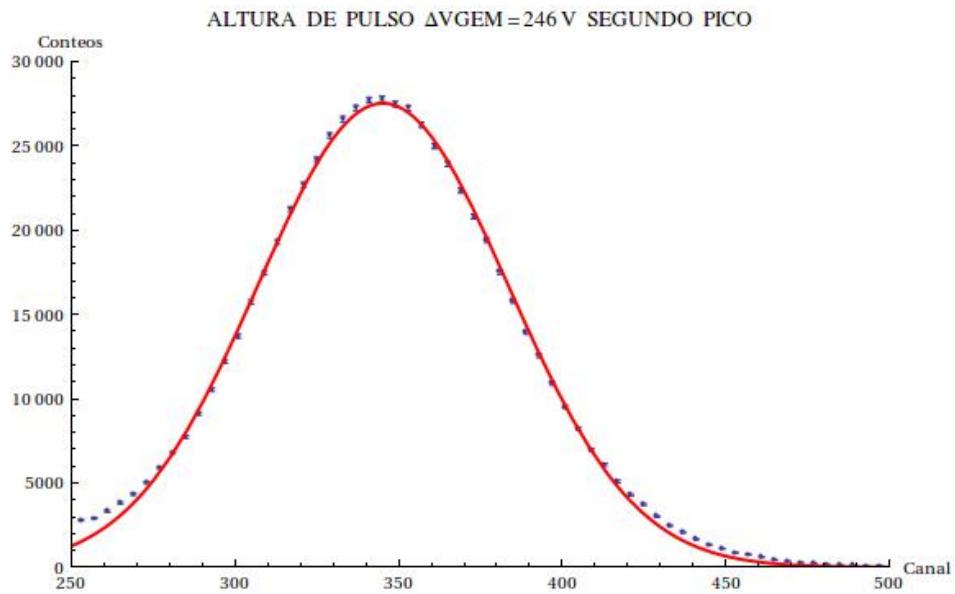


Figura 4.9: Pico para  $^{55}\text{Fe}$  de 5.9keV  $\Delta\text{VGEM}=246\text{V}$  con una resolución de energía de 26.1 %.

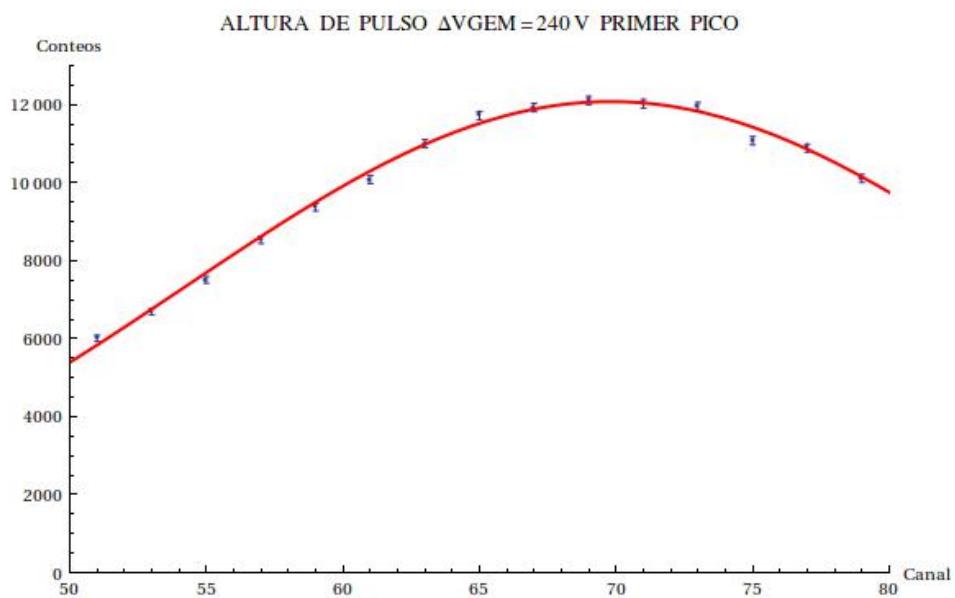


Figura 4.10: Pico de escape del argón para un potencial  $\Delta\text{VGEM}=240\text{V}$  con una resolución de energía de 52.6 %.

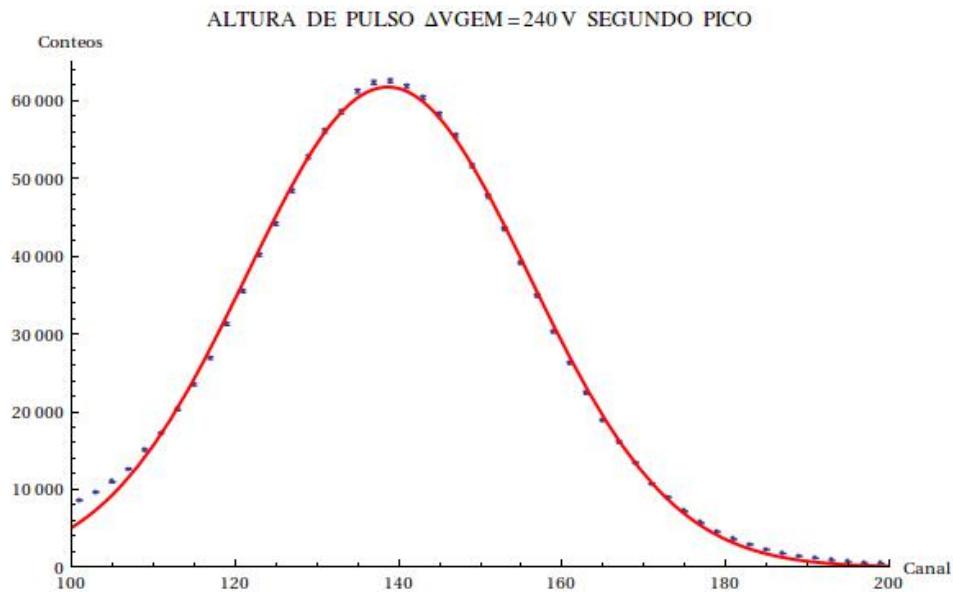


Figura 4.11: Pico para  $^{55}\text{Fe}$  de 5.9keV  $\Delta\text{VGEM}=240\text{V}$  con una resolución de energía de 29.4 %.

Se observa que la resolución de energía varía en función del potencial y se acerca a la enunciada en la literatura del 20 % para los potenciales intermedios en el pico de 5.9keV del  $^{55}\text{Fe}$ .

El cálculo de la resolución de energía se desarrolló elaborando un fit sobre cada una de las curvas y encontrando los valores correspondientes a la posición del pico  $\mu$  y la desviación estandar  $\sigma$  en un ajuste gaussiano.

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2(\sigma)^2}} \quad (4.1)$$

Teniendo en cuenta que la relación entre la desviación estandar y el FWHM está dado por:

$$FWHM = 2(2\ln(2))^{\frac{1}{2}}\sigma \quad (4.2)$$

Entonces la resolución de energía  $RE$  queda dada por:

$$RE = \frac{FWHM}{\mu} \quad (4.3)$$

### 4.3. Resolución de Posición

Anteriormente se ha mencionado que los ánodos o strips de lectura se encuentran divididos en dos secciones que bien se pueden denominar sección izquierda y sección derecha. Cada sección cuenta con 128 strips de lectura que actúan como una placa. Con ayuda de la electrónica propia de la amplificación, Preamplificador Ortec 113 y Amplificador Ortec 672 combinados con el Dual Channel BCD Scaler Modelo 1880C y el Discriminador PS Modelo 710, es posible realizar conteos de eventos  $NI$ =(número de eventos izquierda) y  $ND$ =(número de conteos derecha) en función de la posición trasversal a los strips.

Empleando la fuente de  $^{55}\text{Fe}$  se realizan conteos para posiciones transversales a los strips desde 0 a 10 cm a través de la ventana de entrada del detector. Se define la siguiente función:

$$R = \frac{ND - NI}{ND + NI} \quad (4.4)$$

como la función que determina la posición de la fuente radioactiva en función de  $x$ . Para las diferentes posiciones sobre la ventana del detector se obtiene la siguiente gráfica:

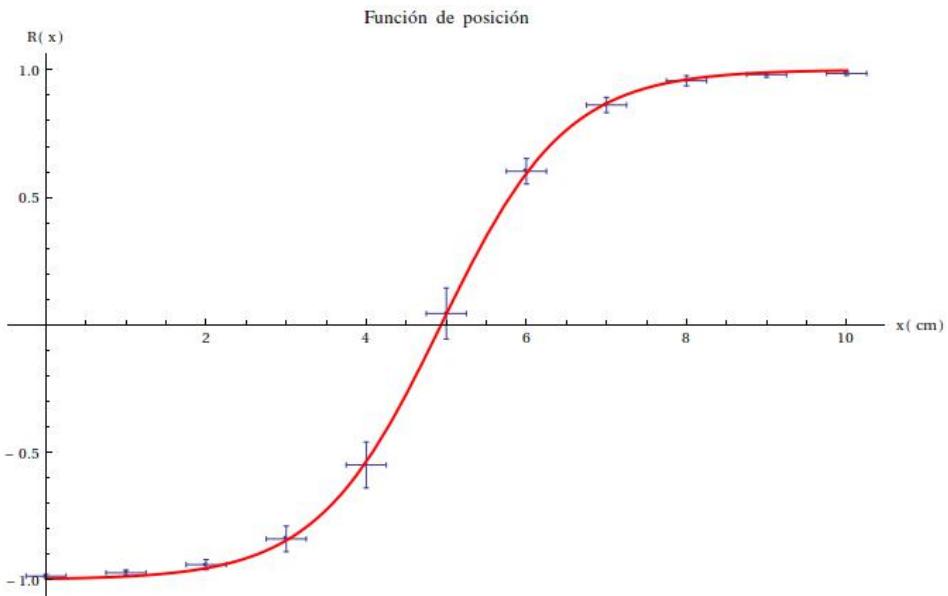


Figura 4.12: Función de resolución espacial para un ánodo segmentado en 2.

Al desarrollar el fit sobre los datos, se determina que la función que mejor se ajusta a los datos experimentales es

$$R(x) = \tanh(ax + b) \quad (4.5)$$

Con lo cual se puede determinar la posición de una fuente radioactiva o de un haz de partículas en función de los conteos de NI y ND. La resolución espacial depende de lo colimado que sea el haz de partículas. En el caso de la muestra de  $^{55}\text{Fe}$  las medidas fueron tomadas con la fuente a 5 mm arriba de la ventana del detector razón por la cual se tomo una resolución aproximada de 5 mm que corresponde al diámetro de la muestra.

## 4.4. Ganancia

La ganancia de un detector se define como la razón entre la cantidad de electrones generados a partir de las etapas de multiplicación y la cantidad total de electrones generados por la partícula incidente. Para este tipo de medida en general se emplea una fuente de rayos X, que produzca un haz constante de fotones de la misma energía, con lo cual se puede calcular la ganancia efectiva  $G_{efe}$  del detector a partir de

$$G_{efe} = \frac{I_{lectura}}{n_{total} F e} \quad (4.6)$$

Donde  $I_{lectura}$  corresponde a la corriente medida en el electrodo de lectura,  $F$  a la interacción de flujo,  $e$  a la carga elemental y  $n_{total}$  a la cantidad de electrones generados por ionización en un cm.

$$n_{total} = n_{parAr} * 0,75 + n_{parCO_2} * 0,25 \quad (4.7)$$

Donde  $n_{parAr}$  es el número de pares creados en un cm de Ar y  $n_{parCO_2}$  es el número de pares creados en un cm de  $CO_2$ . Sin embargo esta cantidad no puede ser calculada de esta manera debido a la falta de una fuente de rayos X con estas características. Pero una medida aproximada de la ganancia es posible gracias a las señales tomadas directamente del osciloscopio, ver figura 4.13.

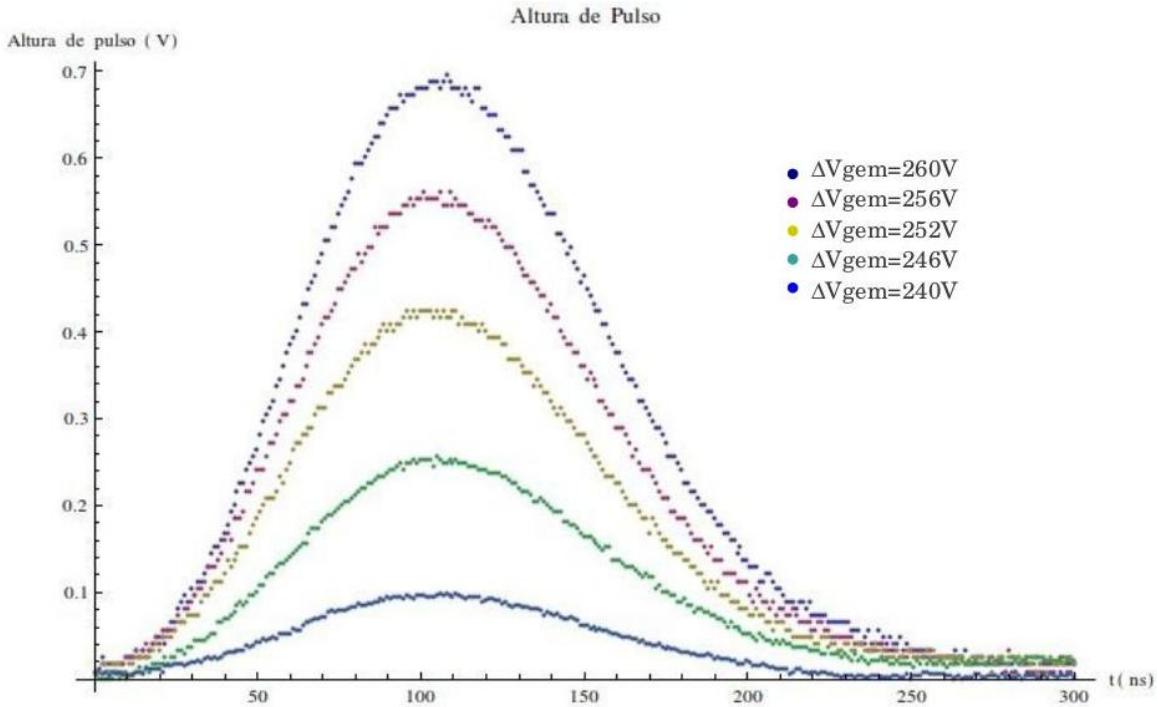


Figura 4.13: Señal directa del osciloscopio.

En la figura 4.13 es posible observar la altura de la señal en función del tiempo. Esta señal corresponde a una diferencia de potencial medida en la resistencia de  $100\text{ k}\Omega$  para cada diferencia de potencial de multiplicación  $\Delta V_{\text{GEM}}$ . La resistencia de  $100\text{ k}\Omega$  que se puede identificar en la figura 3.15 (a) y (b). Esta diferencia de potencial se encuentra amplificada 300 veces gracias al amplificador Ortec 672. El comportamiento lineal del amplificador hace que sea posible determinar la corriente aproximada que circula por la resistencia de la siguiente manera:

$$I = \frac{V_{\text{lectura}}}{100k\Omega} \quad (4.8)$$

Donde  $I$  es la corriente para cada voltaje de lectura  $V_{\text{lectura}}$ . De esta manera es posible reconstruir la señal de corriente en función del tiempo para cada potencial de multiplicación  $\Delta V_{\text{GEM}}$ , ver figura 4.14 a 4.19.

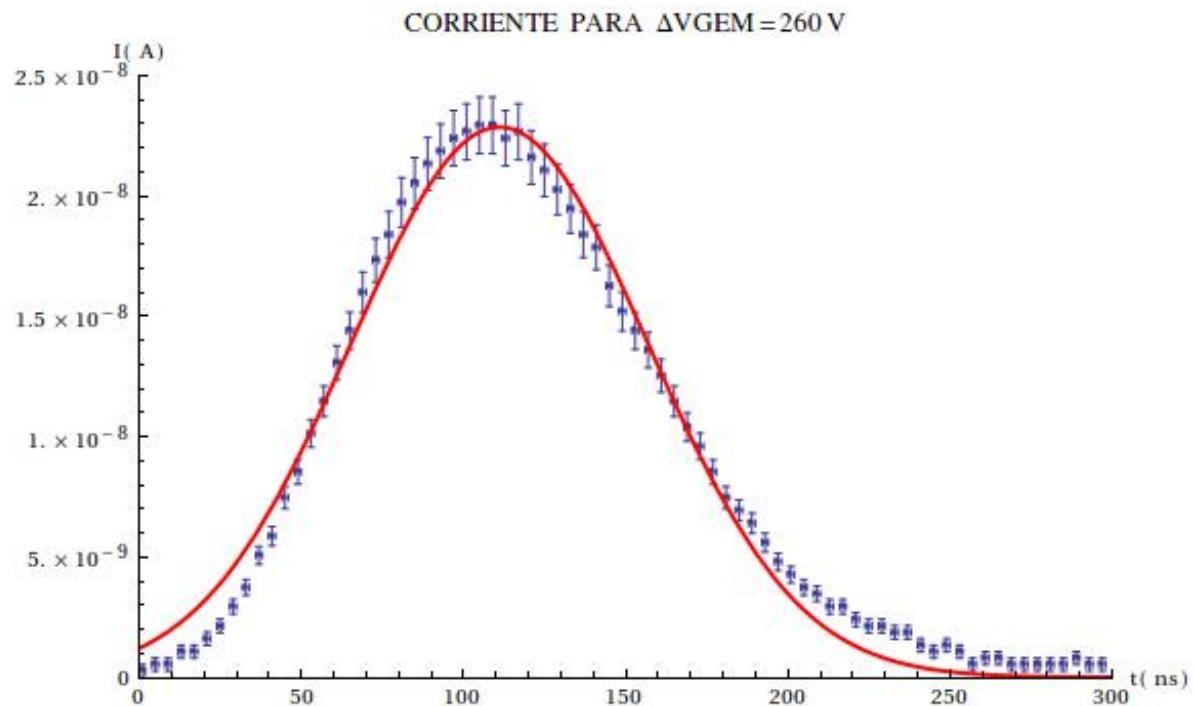


Figura 4.14: Corriente para  $\Delta V_{GEM}=260\text{V}$  en función del tiempo.

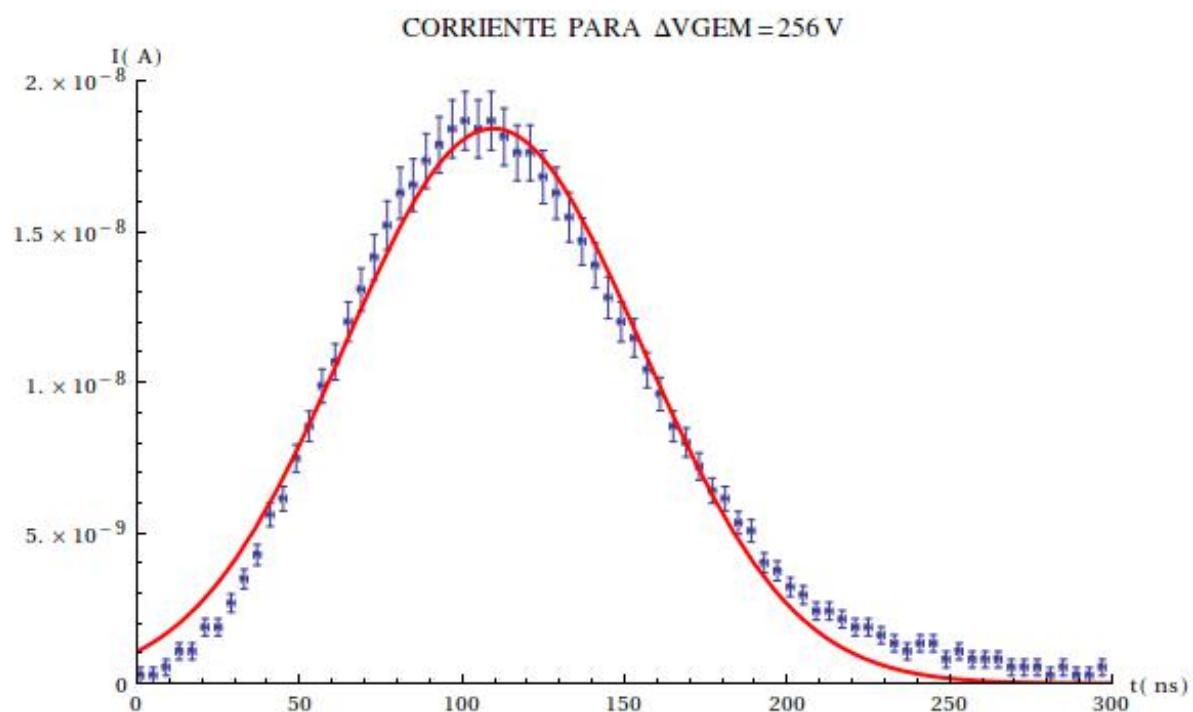


Figura 4.15: Corriente para  $\Delta V_{GEM}=256\text{V}$  en función del tiempo.

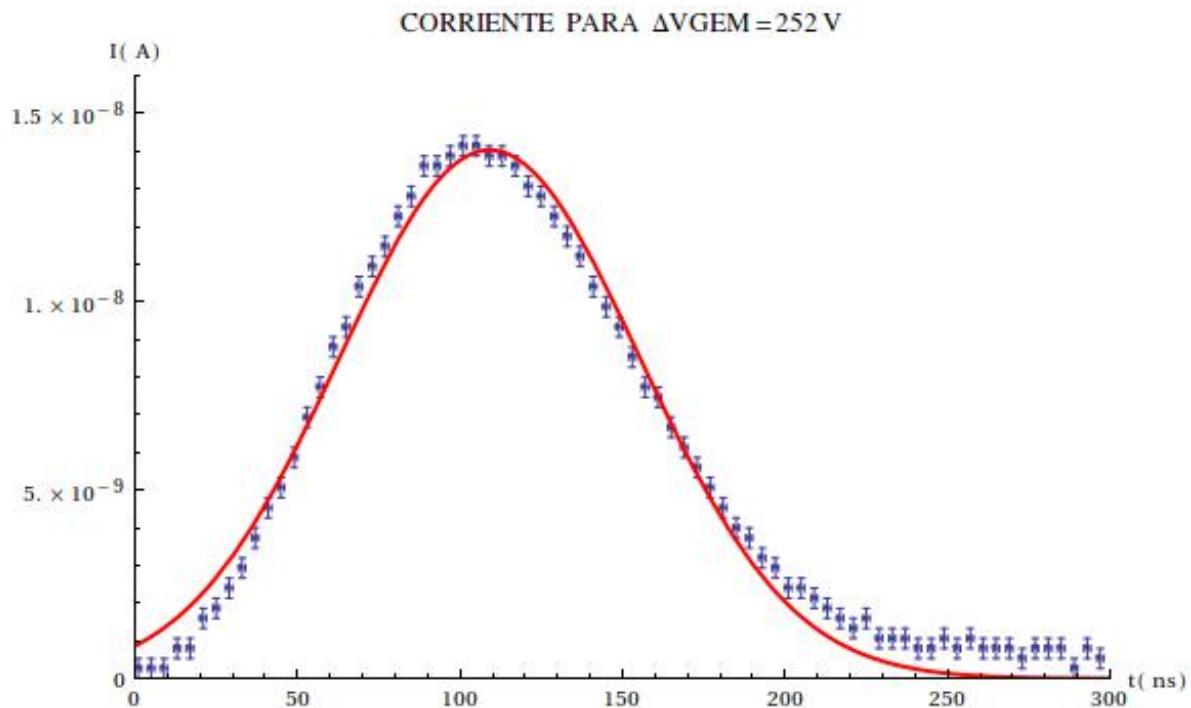


Figura 4.16: Corriente para  $\Delta V_{GEM}=252\text{V}$  en función del tiempo.

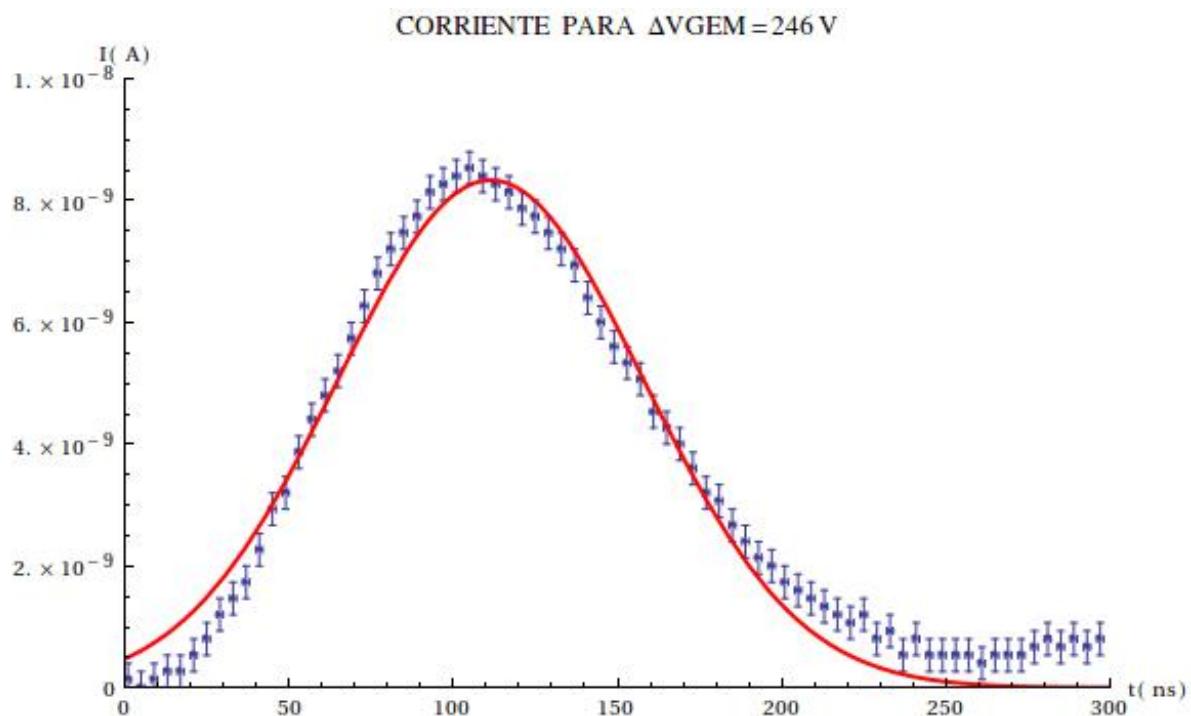


Figura 4.17: Corriente para  $\Delta V_{GEM}=246\text{V}$  en función del tiempo.

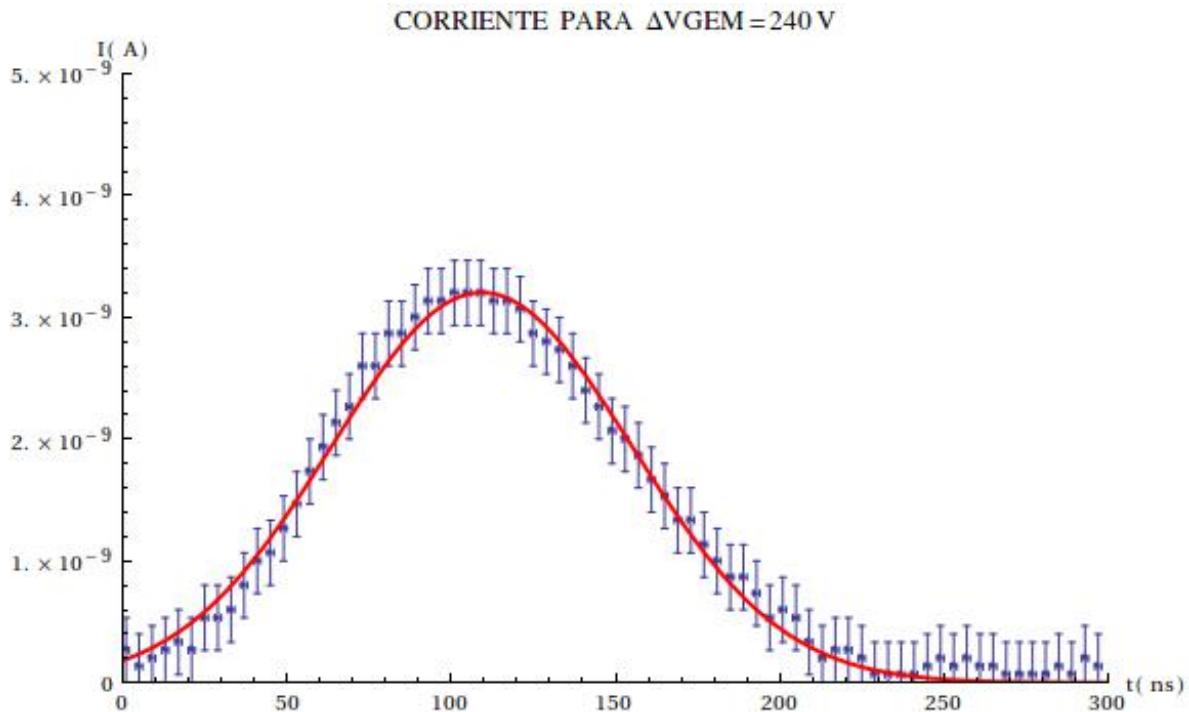


Figura 4.18: Corriente para  $\Delta VGEM=240V$  en función del tiempo.

Integrando la función de fit para cada curva es posible encontrar la cantidad de electrones que llegan al ánodo en el intervalo de tiempo de la señal y con esto determinar la ganancia  $G_{aprox}$  como:

$$N_{lectura} = \frac{Q}{e} \quad (4.9)$$

$$G_{aprox} = \frac{N_{lectura}}{n_{total}} \quad (4.10)$$

Donde  $Q$  es la carga total calculada con la integral,  $e$  la carga elemental,  $N_{lectura}$  el número de electrones que llega al ánodo y  $n_{total}$  es el número de pares creados en 3 mm de la mezcla aproximadamente 8. Con estos datos es posible determinar la dependencia de la ganancia  $G$  en función del potencial de multiplicación  $\Delta VGEM$ , ver figura 4.19.

La ganancia que se observa en la figura 4.19 no muestra la característica forma exponencial que se encuentra en diversos artículos, la razón está dada por el limitado intervalo de potenciales que se han trabajado, las limitaciones en este potencial radican en:

- La formación de señal en la parte baja del potencial, por debajo de los 240V, es imperceptible y si es amplificada se enmascara con el ruido eléctrico de la señal.

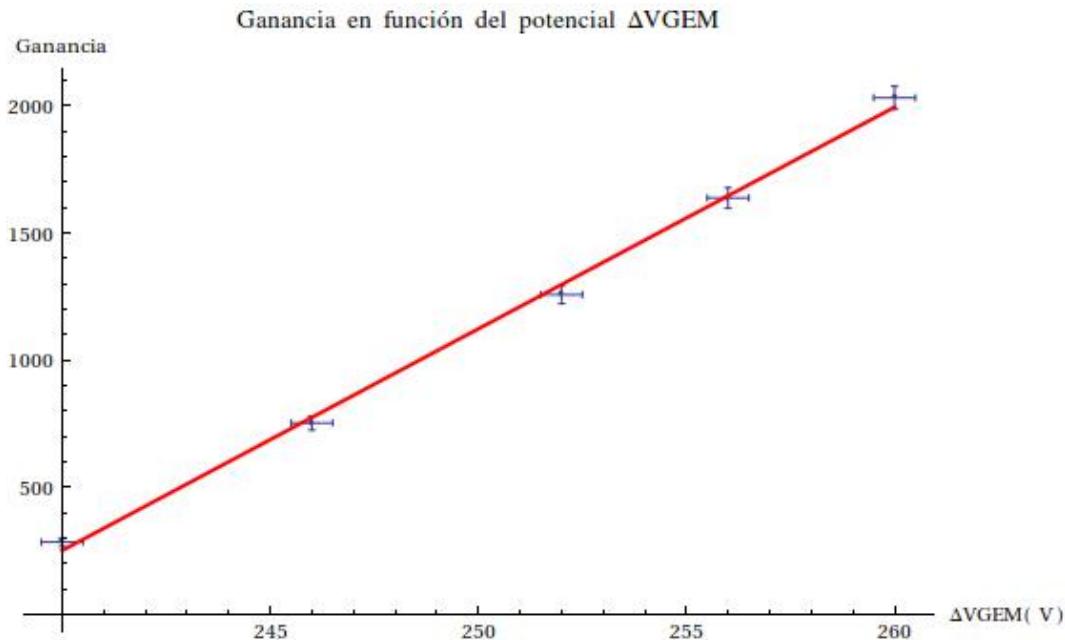


Figura 4.19: Ganancia en función de la diferencia de potencial de multiplicación  $\Delta VGEM$ .

- La formación de señal en la parte alta del potencial, arriba de los 260V, presenta continuas descargas que impiden el funcionamiento óptimo del detector y pueden generar daños sobre la superficie de los GEMfoils.

## 4.5. Resolución de Tiempo

La resolución de tiempo de cualquier detector determina el intervalo temporal en el cual el detector registra una señal. El flujo de radiación incidente sobre un detector se define como la cantidad de partículas que inciden sobre una unidad de área en una unidad de tiempo. Los conteos que efectua un detector aumentan linealmente al aumentar el flujo de partículas incidentes en éste, sin embargo existe un límite para estos conteos llamado punto de saturación, en este límite aumentar el flujo de partículas no aumenta el número de conteos.

$$\Phi \propto \frac{N_{part}}{Area \cdot Tiempo} \quad (4.11)$$

De esta forma determinar la resolución de tiempo del detector TGEM consiste en un proceso de conteo durante un intervalo de tiempo fijo. Empleando la seis fuentes

$^{55}\text{Fe}$  una de  $25 \mu\text{Ci}$  y cinco de  $10 \mu\text{Ci}$  se intenta emular un flujo de partículas variable sobre el detector. La resolución de tiempo entonces se define como:

$$\tau = \frac{T_{exp}}{\text{Conteos}} \quad (4.12)$$

Donde  $T_{exp}$  es el tiempo de exposición, fijando este tiempo en 10 minutos se realizan conteos variando la actividad de la fuente de 25 a  $75 \mu\text{Ci}$  los resultados de esta medida se pueden observar en la figura 4.20.

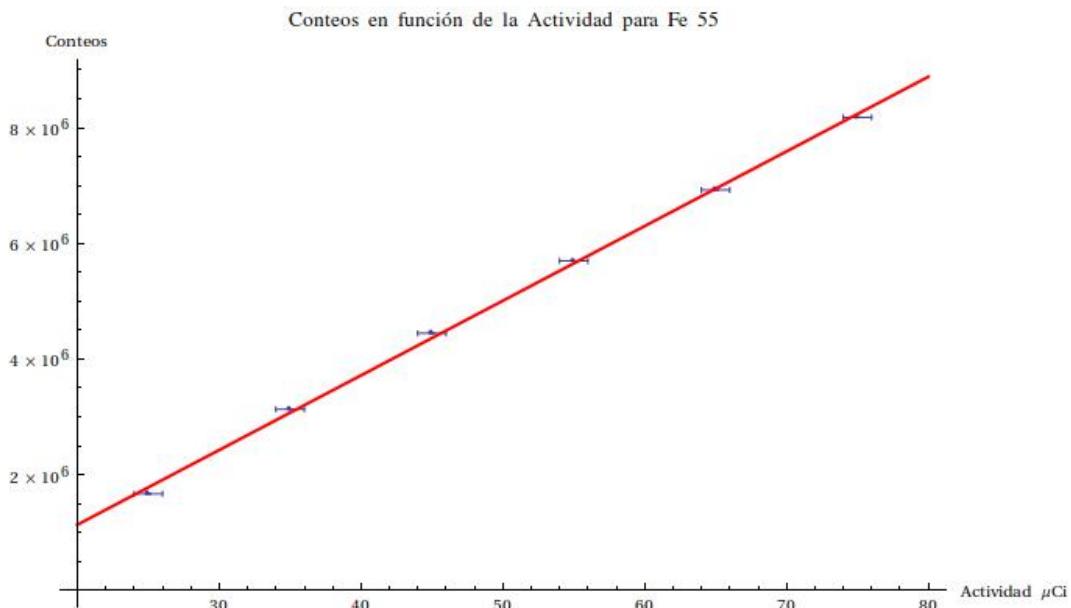


Figura 4.20: Conteo en función de la actividad de la fuente. Los datos fueron tomados cada uno en un intervalo de tiempo de 10 minutos con potencial de multiplicación  $\Delta V_{GEM}=250\text{V}$ .

Con este resultado es posible determinar que la resolución de tiempo para el detector TGEM se encuentra por debajo de los  $75 \mu\text{s}$ . Desarrollar medidas con actividades superiores resulta imposible debido a la falta de fuentes con actividades superiores.

## 4.6. Medida de Fondo de Muones Resultantes de Rayos Cósmicos

Una vez determinado el correcto funcionamiento de la cámara TGEM con la fuente de  $^{55}\text{Fe}$ , se procede a probar su respuesta a la incidencia de muones procedentes de

rayos cósmicos. Para tal fin, se toma un espectro durante 12 horas del fondo de muones para el potencial de multiplicación  $\Delta VGEM = 250V$ , se emplea este potencial debido al buen desempeño del detector con la muestra de  $^{55}\text{Fe}$ . Durante las pruebas con  $^{55}\text{Fe}$  se determina que con el potencial  $\Delta VGEM = 250V$  se obtiene alta ganancia sin presentarse descargas y con una buena resolución de energía.

El resultado de esta medida se observa en la figura 4.21 en la cual las medidas de baja energía no se tienen en cuenta debido a la imposibilidad de separarlas de ruido procedente de otras fuentes.

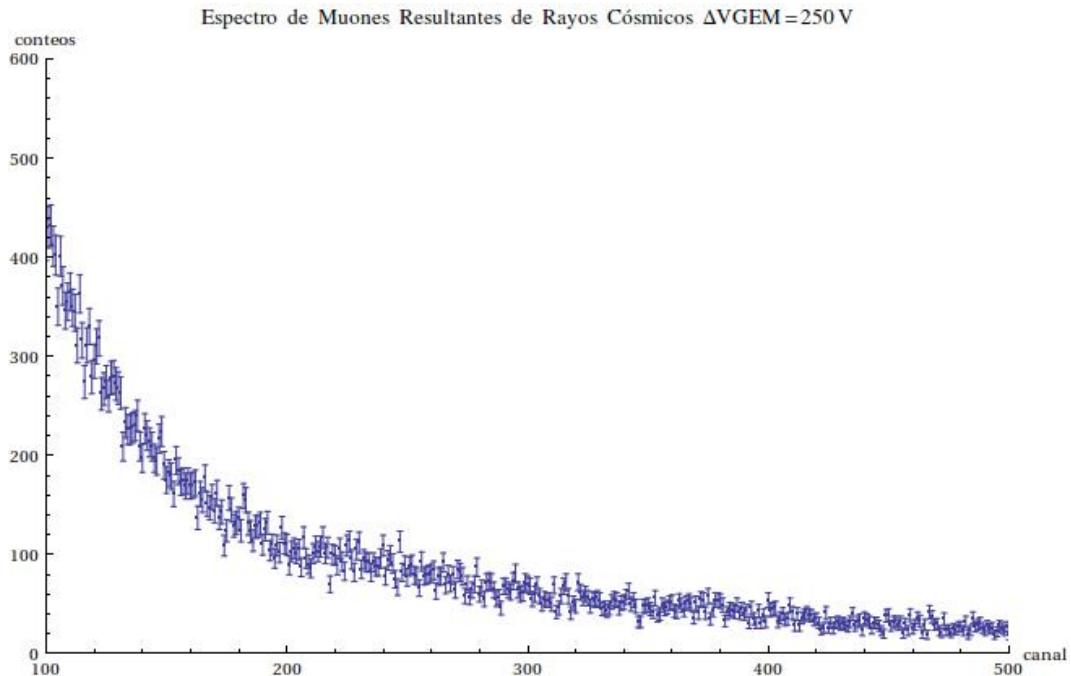


Figura 4.21: Fondo de muones resultantes de rayos cósmicos  $\Delta VGEM=250V$ .

En este espectro se hace evidente el decaimiento de los conteos en función de la energía depositada lo cual es común para este tipo de espectros.

---

# Capítulo 5

## Simulación

Garfield 7.44 es un software especializado en simulación de cámaras de ionización compuestas de alambres o de placas planas. A través de la interfaz Nebem, Garfield se adaptó a diversas geometrías que incluyen estructuras en forma de huecos como las que componen los GEM foil. El cálculo de los campos eléctricos se realiza iterativamente, estableciendo las condiciones de frontera. De esta forma Garfield calcula los valores de campos eléctricos para casi cualquier geometría propuesta.

Garfield es un conjunto de programas que en forma independiente calcula con ayuda de Nebem campos electromagnéticos, con Megaboltz la movilidad de los iones y los electrones en campos electromagnéticos, con ayuda de Heed tasas de interacción y coeficientes para la multiplicación de cargas.

Además realiza simulaciones de Montecarlo para el drift de los electrones a través de los campos electromagnéticos, las avalanchas y a señal obtenida. A continuación se describe sección a sección la simulación desarrollada.

### 5.1. CELL

Permite introducir la geometría de la cámara a partir de celdas iniciales, los sólidos para describir una cámara GEM son: box y hole. En los cuales se establecen los materiales y los potenciales a los que se encuentran sujetos. Con estos potenciales Garfield calcula las líneas equipotenciales y el campo eléctrico asociado a la geometría.

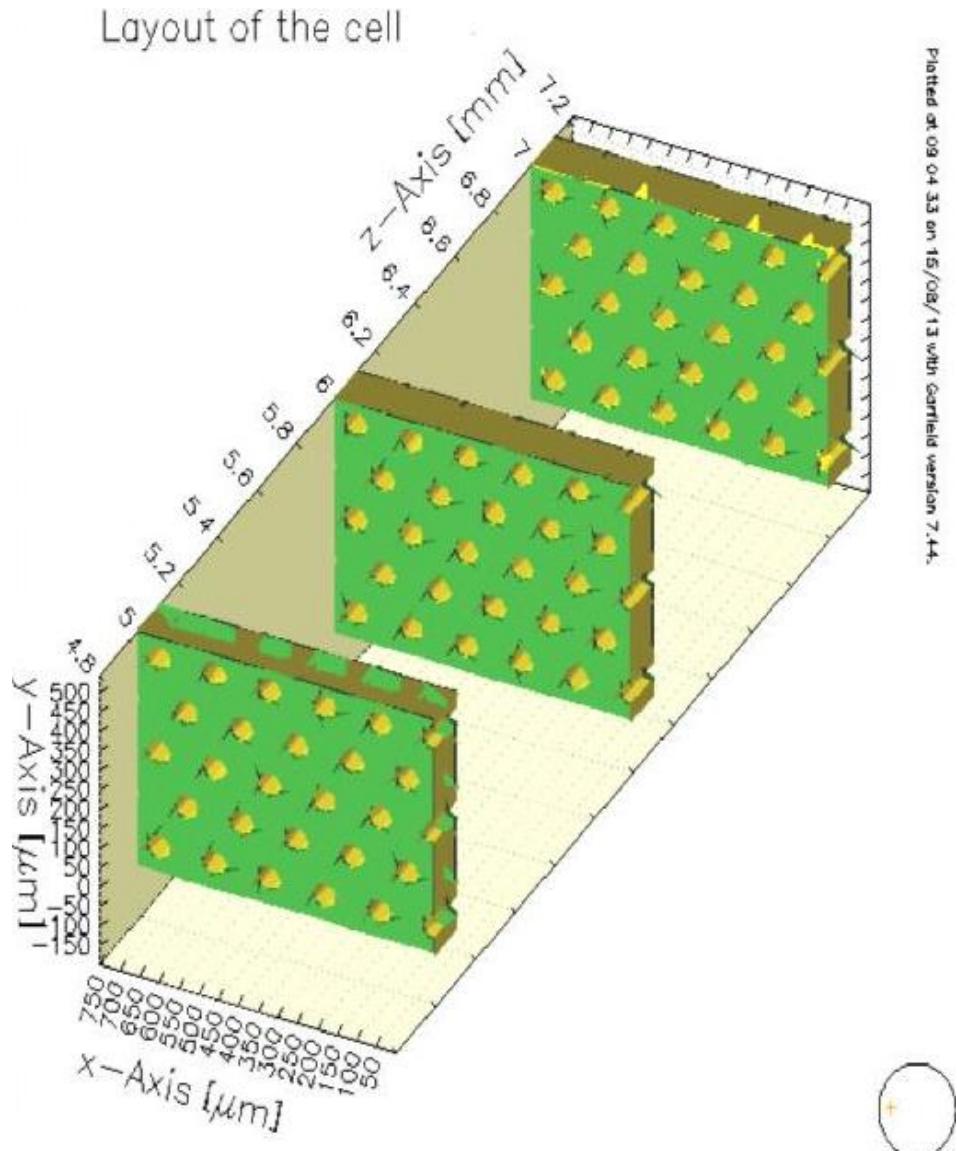


Figura 5.1: Estructura simulada de una cámara de ionización TGEM.

## 5.2. FIELD

En la sección FIELD el cálculo del campo eléctrico es desarrollado a partir de los materiales y los potenciales establecidos en la sección CELL, en la cual NEBEM (nearly exact Boundary Element Method) es un interfaz que calcula el campo eléctrico a partir de Funciones de Green definidas para tres tipos de celdas primitivas: línea de carga, rectángulos y triángulos rectángulos, es por esta razón que cualquier objeto se modela

a partir de estas tres celdas primitivas.

Los potenciales correspondientes a cada superficie son fijados. Para estas condiciones se calculan los campos eléctricos. Los resultados de estas simulaciones se pueden observar en la figura 5.2.

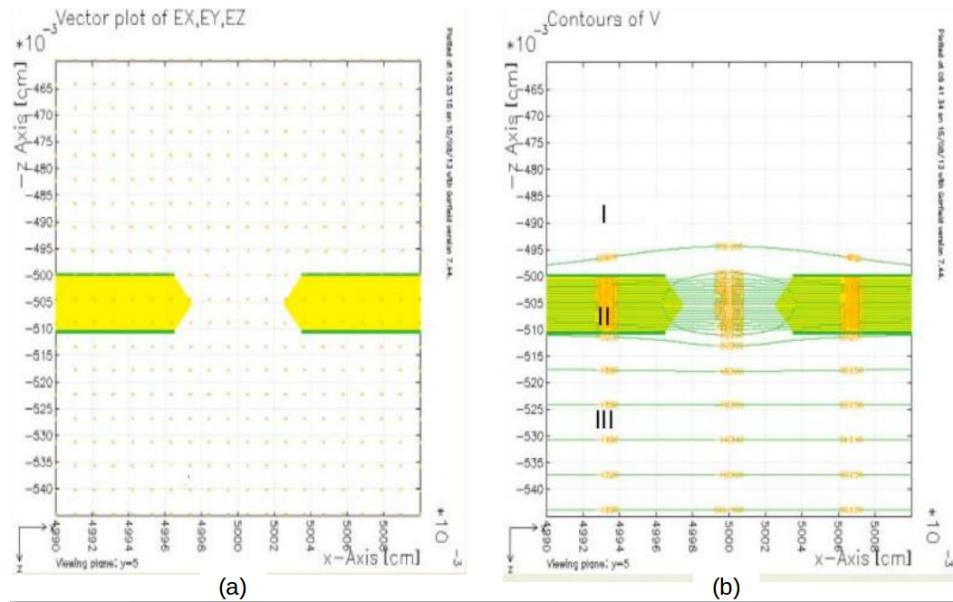


Figura 5.2: (a) Simulación de los vectores de campo eléctrico. (b) Simulación de líneas equipotenciales.

Se observa el típico comportamiento de los vectores de campo eléctrico al curvarse al interior de los agujeros, también se hace evidente la compresión de las líneas equipotenciales en medio del GEMfoil.

También es posible observar la norma del campo eléctrico en las diversas zonas de la cámara de ionización con lo cual se corrobora el papel fundamental de los GEM-foils como multiplicadores de carga al generar enormes campos eléctricos en una zona reducida, ver figura 5.3.

### 5.3. GAS

El gas es un factor relevante al momento de diseñar una cámara de ionización, Garfield incluye un interfaz que desarrolla los cálculos correspondientes a este. Megaboltz

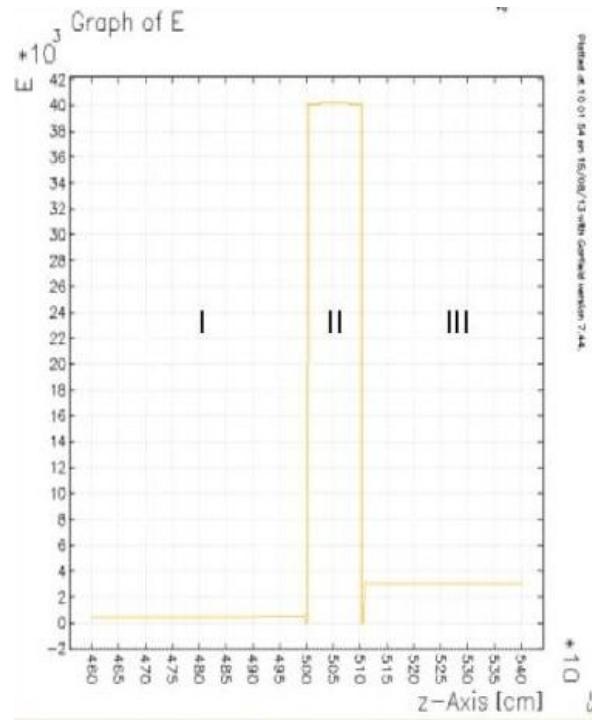


Figura 5.3: Simulación de la norma del campo eléctrico en las diferentes secciones de la cámara de ionización.

y Heed, computa para electrones la velocidad de deriva, los coeficientes de difusión longitudinal y transversal, los coeficientes de avalancha Townsend y de aderencia y las tasas de ionización y exitación de varios tipos de gases. También en esta sección se establecen los parámetros de presión y temperatura de operación los cuales se toman como  $P = 1$  atm y  $T = 300$  K. Megaboltz tiene en cuenta la sección trasversal para procesos inelásticos.

## 5.4. DRIFT

En la sección DRIFT es posible visualizar el camino de los electrones sin tener en cuenta el gas dentro de la cámara, este tipo de visualización muestra las líneas de campo por las cuales los electrones llegan a los strips en los cuales se recopila la señal, ver figura 5.4.

La líneas de campo se ven curvas en la vecindad de los agujeros, lo cual es el comportamiento esperado para este tipo de configuración.

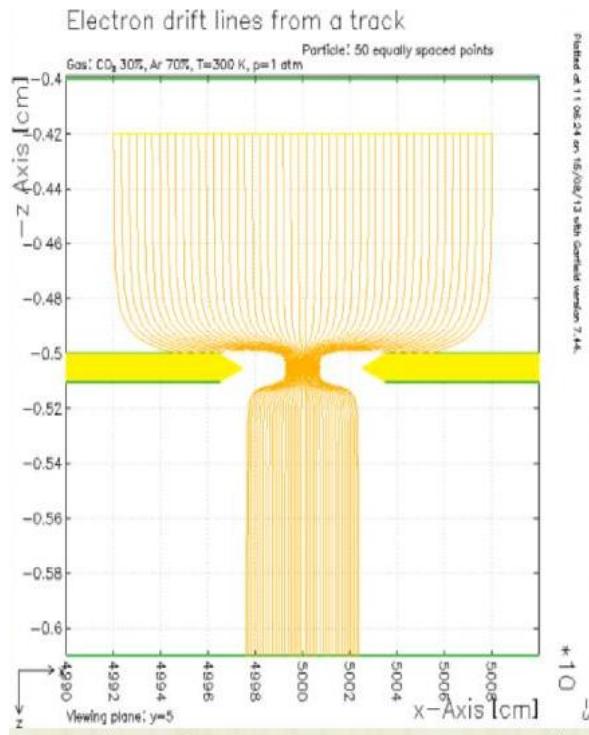


Figura 5.4: Simulación de las líneas de campo eléctrico al interior de la cámara de ionización.

## 5.5. SIGNAL

En la sección de SIGNAL se simulan avalanchas iniciadas a partir de un solo electrón con energías iniciales aleatorias. Estas simulaciones se llevan a cabo variando el potencial de multiplicación  $\Delta V_{GEM}$  con el fin de estudiar el cambio en el tamaño de la avalancha. Las visualizaciones de estas avalanchas y la señal generada se observan en la figura 5.5 (a) y (b) respectivamente.

Con base en estos resultados es posible determinar el comportamiento de la ganancia el cual se hace evidente en la figura 5.6.

En esta figura se observa que el comportamiento de la ganancia para variaciones pequeñas es aproximadamente lineal, lo cual se encuentra de acuerdo con los resultados experimentales reportados en el presente documento.

Para detalles técnicos sobre la instalación del software y la simulación consultar [13].

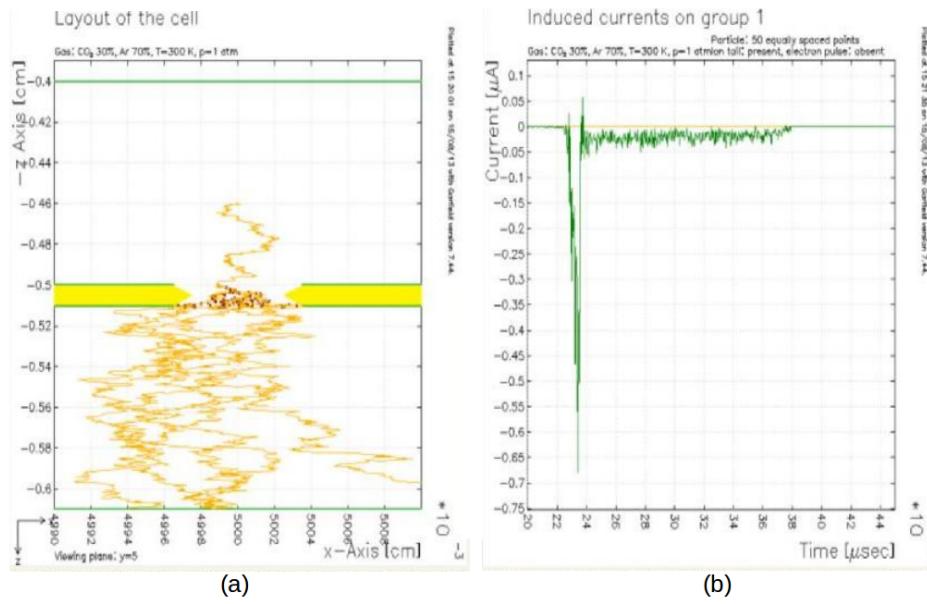


Figura 5.5: (a) Simulación de la avalancha a partir de un electrón con  $\Delta V_{GEM} = 400$  V. (b) Simulación de la señal colectada con  $\Delta V_{GEM} = 400$  V.

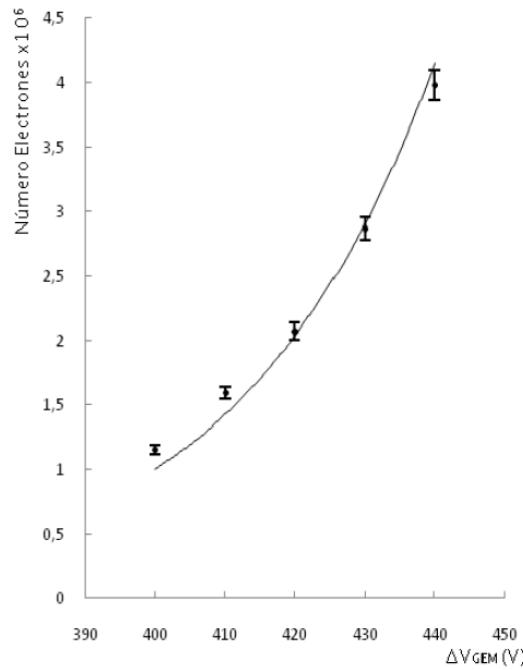


Figura 5.6: Ganancia determinada a partir de los datos de la simulación.

---

# Capítulo 6

## Conclusiones

Se establecieron protocolos básicos al momento de iniciar la primera aproximación a cualquier prototipo de detector GEM. Siguiendo estos protocolos se logró en forma exitosa ensamblar y poner en funcionamiento el prototipo 1.0 de detector Triple GEM.

Se modificaron secciones del detector en busca de mejorar la calidad del ensamble. Al diseñar instrumentos de conexión, que no requieren soldaduras, se ha hecho más eficiente el proceso en términos de ensamble y mantenimiento. Además la implementación de los conectores de presión, permite de manera eficiente modificar las diferencias de potencial de multiplicación sin comprometer la integridad estructural del ánodo (board).

Desde el punto de vista de la alimentación del detector se emplearon resistencias en el divisor de voltaje un orden de magnitud por encima de lo que se emplea normalmente en otros experimentos, la razón estriba en el hecho de no contar con una fuente de voltaje con la potencia suficiente para mantener potenciales altos con resistencias más bajas.

Se determinó la funcionalidad del detector con base en el registro del espectro de la muestra de  $^{55}\text{Fe}$ , la cual es comúnmente usada para caracterizar este tipo de detectores debido a la limpieza de su espectro al no ser un emisor  $\beta$ .

La caracterización de detector se llevó a cabo con la fuente de  $\text{Fe}^{55}$ , con la cual fue posible determinar la resolución de energía del detector que se encuentra dentro de los parámetros dados en la literatura 20 % [2],[8],[16]. También se ha logrado dar al detec-

tor una resolución espacial indirecta, al medir los conteos de izquierda y derecha y con ellos determinar la razón de la diferencia en la suma de conteos de izquierda y derecha para una determinada posición.

La ganancia del detector, como se mencionó, es una ganancia aproximada que fue calculada con la idea primordial de ganancia, como el radio entre el número de electrones que forman el pulso en el osciloscópio y el número de electrones creado en 3mm de mezcla de gases. Se ha logrado determinar que la ganancia del detector evidentemente varía en función de la diferencia de potencial de multiplicación  $\Delta V_{GEM}$  y que esta ganancia alcanza valores desde  $10^2$  a  $10^3$ . La linealidad de la ganancia en función del potencial  $\Delta V_{GEM}$ ; se debe al limitado rango en el potencial de multiplicación que varía entre 240V a 260V.

La respuesta de la cámara TGEM es evidente ante la interacción de muones procedentes de rayos cósmicos. La altura de la distribución aumenta con el potencial de multiplicación. La variación en la posición del pico no presenta una tendencia específica con el potencial de multiplicación.

Los resultados de la simulación muestran concordancia con los resultados obtenidos experimentalmente, al reproducir la variación aproximadamente lineal de la ganancia para intervalos pequeños de potencial de multiplicación  $\Delta V_{GEM}$ .

---

# Bibliografía

- [1] F. Sauli. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. *Nucl. Instr. Meth.*, A386:531, 1997.
- [2] Davenport, Laurie. *Test and characterization of a new Triple-GEM detector*. Massachusetts 2006, Presentada al departamento de fsica de MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY para la obtencin del grado de Bachelor of Science in Physics.
- [3] Tomada de:<http://pamela.physik.uni-siegen.de/pamela/bitmaps/bethe.jpg>
- [4] L. Guirl, S. Kane, J.May, J. Miyamoto and I.Shipsey. An aging study of triple GEMs in Ar-CO<sub>2</sub>. *Nucl. Instr. Meth.*, A478:263-266, 2002.
- [5] S. Kane, J. May, J. Miyamoto and I.Shipsey. An aging study of a MICROMEGAS with GEM preamplification. *Nucl. Instr. Meth.*, A515:261-265, 2003.
- [6] P.S. Barbeau, J. Collar, J. Miyamoto and I.Shipsey. Electron transparency, ion transparency and ion feedback of a 3M GEM. *Nucl. Instr. Meth.*, A525:33-37, 2004.
- [7] J. Miyamoto, I.Shipsey, C.J. Martoff, M. Katz-Hyman, R. Ayad, G. Bonvincini and A. Schreiner. GEM operation in negative ion drift gas mixtures. *Nucl. Instr. Meth.*, A526:409-412, 2004.
- [8] Sipaj, Andrej. *Simulation, Desing and Construction of a Gas Electron Multipliers for Particle Tracking*. Canada 2012, Presentada la facultad de Energy Systems ans Nuclear Science Program de UNIVERSITY OF ONTARIO INSTITUTE OF TECHNOLOGY para la obtencin del grado de Master of Applied Science.

- [9] Vargas, Omar.*Experimental Setup for the Operation of Gas Electron Multipliers in Liquid-Gas Xenon Detectors.* Houston, Texas 2004, Presentada al departamento de fsica de RICE UNIVERSITY para la obtencin del grado de Master of Science.
- [10] R. Bouclier, M. Capens, W. Dominik, J-C. Labb, G. Million, L. Ropelewski, F. Sauli and A. Sharma. The Gas Electron Multiplier (GEM) Genve, Switzerland. *Nucl. Instr. Meth.*, A515:261-265, 2003.
- [11] J. Yamaoka, H. Feng, M. Garcia-Sciveres, I. Jaegle, J. Kadyk, Y. Nguyen, M. Rosen, S. Ross, T. Thorpe and S. Vahsen. Aplication of Time Projection Chambers with GEMs and Pixels to WIMP Searches and Fast Neutron Detection. *physics.ins-det.*, arXiv:1206.2378v1. 11 Jun 2012
- [12] C. Altumbas. Construction, test and comissioning of the triple-GEM tracking detectorfor Compass. *Nucl. Instr. Meth.* ,A490:177, 2002.
- [13] [gdd.web.cern.ch/GDD/](http://gdd.web.cern.ch/GDD/)
- [14] D. Abbaneo, M. Abbrescia, P. Aspell, S. Bianco, K. Hoepfner, M. Hohlmann, M. Maggi, G. De Lentdecker, A. Safonov, A. Sharma, M. Tytgat *A GEM Detector System for an Upgrade of High- $\eta$  Muon Endcap Statios GE1/1 + ME1/1 in CMS* Geneva 2012, CMS Note.
- [15] AHMED, Syed.*Physics and Engineering of Radiation Detection.* ACADEMIC PRESS, 2007.764 p. ISBN-10:0-12-045581-1
- [16] A. Bamberger,K. Desch, U. Renz. Results of studies with a small TPC prototype Readout with GEMs and TimePix.
- [17] KNOLL.Glenn.*Radiation Detection and Measurement*,WILEY,1999, ISBN0-471-07338-5.