

## Planeación, Diseño, Construcción y Caracterización de 3 cámaras Mutialámbricas Proporcionales para Detección de Rayos Cósmicos

Becerra Zamudio Juan<sup>1</sup>. Cuevas Cázares José Pablo<sup>2</sup>. Rodríguez Nachez Emmanuel Judá<sup>3</sup>, J. Félix<sup>4</sup>.

<sup>1,2,3,4</sup>División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato

j.becerrazamudio@ugto.mx<sup>1</sup>, jp.cuevascazares@ugto.mx<sup>2</sup>, ej.rodrigueznachez@ugto.mx<sup>3</sup>, felix@fisica.ugto.mx<sup>4</sup>

### Resumen

Los detectores de radiación tienen muchos usos en la ciencia, en la industria, en la medicina, etc. En el presente trabajo se planeó, diseñó, construyó y caracterizó un conjunto de 3 cámaras multialámbricas, con el objetivo de detectar y estudiar la radiación cósmica incidente. El diseño de las cámaras multialámbricas está basado en SketchUp; la construcción, en una tarjeta electrónica de 10 cm x 10 cm y otra de 5 cm x 5 cm, y en un bastidor de plástico. El funcionamiento, en una fibra de tungsteno recubierta de oro tensada a 20 g y aire a una atmósfera de presión. Reportamos los detalles técnicos del diseño y la construcción y algunos resultados preliminares de la caracterización de este conjunto de cámaras multialámbricas.

**Palabras claves:** ionización, cámara multialámbrica, medio gaseoso, contador proporcional, efecto Auger, radiación cósmica.

### Introducción

La detección de radiación es de suma importancia en muchos campos de la física, de la industria y la medicina. Constantemente se están produciendo e innovando nuevas formas de detectar radiación. La cámara plana de varios alambres, o multialámbrica, es una tecnología de detección de radiación muy conocida y estudiada, con muchas ventajas sobre otras tecnologías de detección de radiación ionizante.

La cámara proporcional multialámbrica (MWPC por sus siglas en inglés) fue desarrollada por Georges Charpak entre 1967 y 1968, cuando éste trabajaba en alguna manera de desarrollar un detector cuyo análisis de datos pudiese ser hecho a través de un circuito digital [1]. Los principios de operación de ésta, basados en la descripción cuantitativa de la interacción entre iones y electrones en un medio gaseoso bajo la influencia de un campo eléctrico externo, ya eran conocidos y habían sido estudiados y descritos décadas antes de la invención de la cámara. Los estudios acerca de la MWPC comenzaron a partir de los problemas encontrados en las cámaras de chispas (introducidas por Fukui y Myamoto en 1959). Debido a la necesidad de almacenar grandes cantidades de información, o a eventos (detección de partículas), más allá de unos cuantos millones de fotografías por año, se buscó mejores equipos [1]. Es por ello que se desarrollaron nuevas tecnologías para la recopilación y análisis de datos, dentro de las cuales, Charpak y sus colaboradores introdujeron dos. La primera de ellas se basaba en la medición del retraso de la señal producida por una chispa al llegar a parte final de un electrodo. La segunda, para medir las coordenadas de la chispa producida, y por tanto de la partícula mediante el uso de medios puramente electrónicos.

Conforme mejoró el diseño y operación de los diversos dispositivos que hoy conforman a la electrónica moderna, también lo hicieron la precisión, resolución temporal y el conteo automático de eventos. Hoy en día la MWPC está incluida en muchos detectores de conteo rápido, y su uso también ha sido extendido a muchas otras áreas de la física aplicada, e. g. astronomía de iones pesados y rayos X, física nuclear en la medicina y cristalografía de las proteínas [6]. A pesar de su extendido uso y aplicaciones, la MWPC sigue siendo aún objeto de estudio e innovación, ya que, en muchos aspectos, estos dispositivos continúan teniendo un carácter experimental, por ende, teniendo aún atributos que son objeto de investigación científica para su mejoría.

En la sección siguiente explicamos el funcionamiento físico de las MWPC.

## Principios de operación

Una partícula cargada que incide sobre un medio a velocidades relativistas puede interactuar con éste de muchas maneras. De todas estas interacciones, generalmente la interacción electromagnética es la interacción buscada para entender y describir la detección de partículas, puesto que la probabilidad de interacción electromagnética de una partícula cargada con un medio es varios órdenes de magnitud mayor que una interacción nuclear de tipo fuerte o débil [6]. Así mismo, existen muchos tipos de interacción de carácter electromagnético entre partículas cargadas y medios materiales. Como resultados de ellos se encuentran procesos como la radiación de frenado (*bremssstrahlung*, por su nombre en alemán), radiación Chérenkov, radiación de transición, ionización, etc.[6]. El funcionamiento de una cámara MWPC se basa en las interacciones Coulombianas entre los campos electromagnéticos producidos por el detector y los campos producidos por la radiación incidente que se busca detectar, las cuales resultan en excitación y ionización de los átomos del medio gaseoso. La ionización del gas por incidencia de la radiación es la forma en que operan las cámaras MWPC.

### Procesos de ionización

Cuando una partícula cargada eléctricamente atraviesa un medio gaseoso se producen un número discreto de colisiones primarias que a su vez generan un número entero de pares electrón-ion en el mismo medio. Los electrones liberados en el medio pueden tener energía suficiente, la cual tiene que ser mayor al potencial de ionización del gas, para ellos a su vez ionizar aún más el medio, lo cual consecuentemente produce pares electrón-ion secundarios [6]. A la suma de las contribuciones primaria y secundaria se le denomina ionización total. A pesar de que no existe una expresión analítica para el número de pares electrón-ion primarios, se han medido valores para distintos gases del número de pares primarios por unidad de longitud en condiciones normales.

Las colisiones de ionización primarias, al ser un número relativamente pequeño de eventos independientes y que suceden a una tasa determinada siguen la distribución probabilística de Poisson. Entonces, si  $n$  es el número promedio de interacciones primarias ( $n = n_p$ ) la probabilidad de tener  $k$  interacciones en un evento está dada por

$$P_k^n = \frac{n^k}{k!} e^{-n} \quad (1).$$

Existen interacciones de naturaleza electromagnética a través de las cuales la partícula incidente puede perder energía y ser absorbida por el gas sin generar iones. Uno de ellos es precisamente el proceso de excitación, en donde la partícula incidente energiza a uno de los electrones de la molécula gaseosa y lo eleva a un estado ligado mayor sin que lo retire del átomo. Por ende, la energía promedio perdida por par iónico de la partícula incidente (en la literatura denotada como  $W_{value}$ ) es casi siempre muy superior a la energía de ionización de la molécula. Se ha encontrado que este valor es sorprendentemente una función débil de los parámetros de energía, tipo de gas y tipo de radiación, es decir, es un parámetro constante para muchas especies y tipos de gases distintos [3].

### Contadores proporcionales

Cuando una partícula cargada eléctricamente colisiona con las moléculas de un medio gaseoso, mediante los procesos descritos en la sección anterior, es posible recolectar los electrones liberados por la ionización del medio, pudiendo así obtener información acerca de la partícula que incidió en el medio. Puesto que, por sí sola la partícula incidente no genera una señal con una amplitud lo suficientemente grande como para ser detectada, es necesaria la implementación de un campo eléctrico en el medio gaseoso. Mediante la implementación del campo eléctrico ocurre el proceso de *cascada* o *cascada electrónica*. Para el caso particular de gases, el proceso de multiplicación electrónica se conoce como *avalancha de Townsend*.

Bajo ciertas condiciones, una avalancha puede dar lugar a la generación de otra avalancha en un lugar distinto dentro del contador, y cuando el campo eléctrico alcanza un valor crítico, en promedio cada avalancha puede generar su propia avalancha asociada, lo que resulta en un proceso exponencial (esto puede ser visto dada la solución a la ecuación de Townsend) que diverge rápidamente, lo cual implica un valor muy alto de una *descarga de Geiger*, como se le denota en la literatura. Sin embargo, una vez que se alcanza un punto máximo, el gas se encarga de absorber la energía (que se emite también en forma de fotones) y finalmente el proceso termina [3].

Para detectores planos, la señal detectada depende de la longitud de la avalancha, es decir, del punto donde originalmente se produjo la carga inicial, lo que implica una no-obtención de proporcionalidad entre la energía depositada por la partícula y la señal detectada. Es por ello que mediante la experimentación se encontró que una geometría cilíndrica coaxial permite evadir ésta y otras dificultades. Ésta consiste en un alambre delgado-fibra metálica- estirado a lo largo del eje de un cilindro conductor aislado del mismo, de tal manera que una diferencia de potencial pueda ser aplicado entre ellos. La polaridad se escoge de tal manera que el alambre coaxial tenga carga eléctrica positiva con respecto al cilindro exterior. Existe una dependencia de  $\frac{1}{r}$  (donde  $r$  es la distancia radial desde la fibra al punto donde se mide el campo eléctrico) de la intensidad de campo eléctrico entre el cilindro y el alambre, existiendo un máximo en la superficie del ánodo y decreciendo conforme se aproxima al cátodo.

Empleando alambres de un radio muy pequeño, se pueden obtener valores del campo eléctrico en la cercanía de éstos muy altos. Entonces, por el principio de Coulomb, cuando se producen cargas eléctricas por los procesos de interacción primaria (partícula incidente), el campo eléctrico solamente arrastra electrones hacia el ánodo, y las moléculas del gas con carga eléctrica neta positiva son arrastradas hacia el cátodo. Sin embargo, muy cerca del ánodo, usualmente algunos radios del alambre de magnitud, el campo es lo suficientemente intenso como para que la multiplicación comience; por consiguiente, se forma una avalancha en forma de gota con todos los electrones desprendidos en el frente y los iones seguidos de ellos detrás [6]. Se ha encontrado mediante la experimentación que, a voltajes del orden de 200 voltios la recombinación entre pares electrón-ion es aún el fenómeno dominante en el gas. Cuando se alcanza un voltaje de umbral  $V_T$ , el campo eléctrico cerca de la superficie del alambre coaxial es lo suficientemente intenso como para que la multiplicación comience. Cuando el voltaje implementado supera el valor de  $V_T$ , existen ganancias del orden de  $10^4$ , teniéndose aún que la carga sea proporcional, por un factor de proporcionalidad denotado por  $M$ , a la carga depositada originalmente [6].

### Cámara multialámbrica proporcional

Una MWPC consiste básicamente en un conjunto de alambres delgados, que funcionan como ánodos, dispuestos de manera paralela y espaciados igualmente entre sí entre dos planos conductores que funcionan como cátodos. Para una operación exitosa, la distancia  $l$  entre los ánodos y los cátodos es tres o cuatro veces más grande que el espaciado  $s$  entre los alambres. Figura 1, y 2.

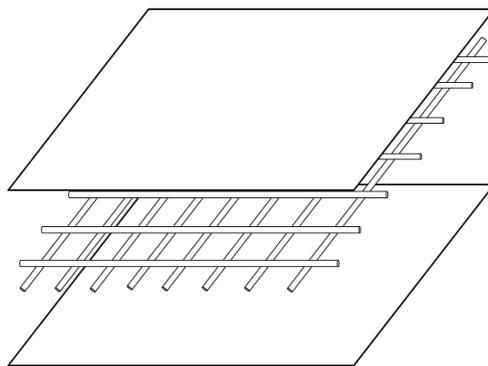


Figura 1. Esquema básico de una MWPC. Consiste en un plano formado por alambres que funcionan como ánodos y dos placas conductoras que funcionan como cátodos en el sistema.

Cuando se aplica un voltaje negativo a los cátodos, estando los ánodos a tierra, se produce un campo eléctrico de líneas equipotenciales en toda la región de los alambres. Entonces, cuando una partícula cargada eléctricamente ioniza el medio gaseoso que se encuentra en el volumen comprendido por los cátodos, los electrones son arrastrados a lo largo de las líneas del campo eléctrico hasta llegar a la región cerca de los ánodos, donde el campo eléctrico adquiere la magnitud suficiente como para que comience la multiplicación electrónica por avalancha [6].

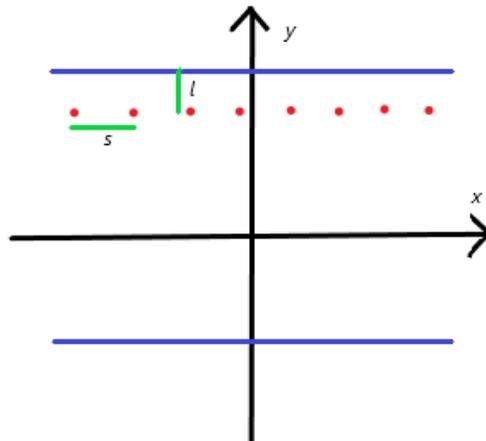


Figura 2. Vista esquemática frontal de la MWPC.

Las expresiones analíticas pueden ser obtenidas mediante un análisis electrostático del sistema, las cuales, dadas las condiciones  $V(a) = V_0$  y  $V(l) = 0$ , y la figura anterior, tienen la forma [6]

-Potencial eléctrico:

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\pi l}{s} - \ln\left(4\left(\sin^2\left(\frac{\pi x}{s}\right)\sinh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right)\right)\right) \right\} \quad (2)$$

-Campo eléctrico:

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2s\epsilon_0} \left\{ 1 + \tan^2\left(\frac{\pi x}{s}\right)\tanh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right) \right\}^{1/2} \left\{ \tan^2\left(\frac{\pi x}{s}\right)\tanh^2\left(\frac{\pi y}{s}\right) \right\}^{-1/2} \quad (3)$$

-Capacitancia por unidad de longitud:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{(\pi l/s) - \ln(2\pi a/s)} \quad (4).$$

donde  $a$  es el radio de los alambres que funcionan como ánodos. En este caso de 0.00254 cm.

## Rayos Cósmicos

Victor Hess, físico austriaco, descubrió los rayos cósmicos mientras realizaba un vuelo sobre globo al detectar la tasa de ionización de la atmósfera como función de la altura a la que ascendía, con lo cual determinó que la tasa de ionización aumentó aproximadamente 3 veces a una altura de 5300 m con respecto a la que detectó a nivel del mar. Con ello, concluyó que existía una radiación penetrante que solamente podía provenir de la atmósfera, descubriendo así los rayos cósmicos [4].

Victor Hess buscó clarificar el origen de esta radiación, para lo cual ascendió en un globo aerostático durante un eclipse casi total el 12 de abril de 1912, realizando mediciones a alturas desde 2 a 3 km. Hess no observó reducción de la ionización de la atmósfera durante el eclipse, lo que lo llevó a concluir que el sol no podía ser una fuente de rayos cósmicos, al menos refiriéndose a los rayos solares no desviados. Actualmente se sabe que el sol es una fuente de rayos cósmicos, sin embargo, por las limitaciones de la época Hess no obtuvo el resultado que tenemos hoy en día [7].

Los rayos cósmicos que inciden en la superficie de la atmósfera terrestre son en su mayoría partículas con un tiempo de vida del orden de  $10^{-13}$  s. Además, son en su gran mayoría procedentes de afuera del sistema solar, de hecho, el sol impide su llegada, cuando se compara la actividad solar con la cantidad de radiación cósmica que llega a la atmósfera, se obtiene un decremento de rayos cósmicos conforme se mide mayor actividad solar.

Encima de los rayos cósmicos asociados a fulguraciones solares, existen fuentes más allá del sistema solar, las cuales son "filtradas" o "moduladas" por el viento solar, lo que produce una desaceleración de los rayos cósmicos, y por tanto una reducción de su energía cinética. Se ha medido un decremento del flujo de rayos cósmicos con rigideces por debajo de los 10 GeV y la actividad solar. Además del efecto anterior, los rayos cósmicos son afectados por el campo geomagnético de la tierra de una forma similar [9].

Los rayos cósmicos por su origen se dividen en primarios y secundarios.

- Primarios. Son las partículas que son aceleradas por cuerpos astronómicos (electrones, protones, helio, carbono, oxígeno, hierro y núcleos atómicos de residuo estelar).
- Secundarios. Son producidos por los primarios cuando éstos interactúan con gases interestelares, residuos de estrellas (Litio, berilio, boro).

Cuando se habla de rayos cósmicos en la atmósfera se dice que los primarios son las partículas que llegan a la superficie de la atmósfera y los secundarios son los que se generan cuando los primarios interactúan con la atmósfera. Al interactuar con la atmósfera se forman piones y estos piones decaen en su mayoría en muones y neutrinos muónicos.

En la corteza terrestre la cantidad de rayos cósmicos incidentes están en el siguiente orden de mayor cantidad a menor cantidad (rayos cósmicos con energía mayor a 1 GeV):

1. Neutrinos Muónicos.
2. Muones (pierden alrededor de 2 GeV de energía en su paso por la atmósfera hasta el nivel del mar).
3. Protones y Neutrones.
4. Electrones.
5. Piones.

La mayoría de los muones que llegan al nivel del mar tienen alrededor de 4 GeV de energía. La cantidad de muones que llegan al nivel del mar con energías mayores a 1 GeV es de alrededor de  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  [9].

Se tiene la idea de que los rayos cósmicos están distribuidos de forma isotrópica en el espacio, sin embargo, recientemente se ha encontrado que al medir el flujo en ciertas regiones en el espacio hay anisotropías causadas por fuentes de rayos cósmicos en nuestra galaxia [8].

## Efecto Auger

Cuando los rayos cósmicos primarios interactúan con la atmósfera terrestre o con el gas interestelar se producen rayos cósmicos secundarios. En tales interacciones generalmente se crean muchas partículas nuevas y los núcleos que chocan se desintegran en gran medida.

Los rayos cósmicos secundarios están compuestos principalmente de partículas cargadas eléctricamente llamadas piones que decaen en muones, neutrinos y electrones. Se producen electrones y fotones por el decaimiento de mesones eléctricamente neutros [9].

Las partículas formadas por la interacción de los rayos cósmicos primarios con los núcleos en la atmósfera interactúan con otros núcleos formando una cascada de partículas. En su camino y en cada interacción las partículas pierden energía y eventualmente no podrán crear nuevas partículas. Después de algún punto, el máximo de la lluvia, se detienen más partículas de las que se crean y el número de partículas de la lluvia disminuye. Sólo una pequeña fracción de las partículas generalmente llega al suelo. Cuántos bajan dependen de la energía y el tipo del rayo cósmico incidente y la altitud del suelo (nivel del mar o montaña). A la producción de partículas secundarias debido a rayos cósmicos primarios se le nombran Air Showers o Auger Showers [4]. Ver Figura 3.

Cuando miles o millones de estas partículas secundarias arriban a la superficie terrestre se denominan Extensive Air Showers (EAS). La mayoría de estas partículas llegarán a unos cientos de metros del eje de movimiento de la partícula original, el eje de la lluvia. Pero algunas partículas se pueden encontrar incluso a kilómetros de distancia [9]. La llegada de múltiples partículas simultáneamente esparcidas en el espacio se conoce también como Efecto Auger, en honor al físico Pierre Auger quien fue el primero en notar que dos detectores colocados a muchos metros de separación indicaron ambos la llegada de partículas exactamente al mismo tiempo.

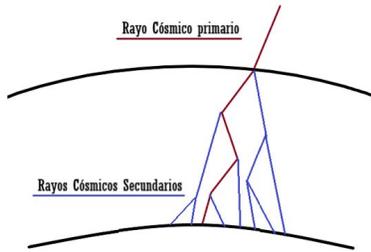


Figura 3. Esquema de producción de rayos cósmicos en la atmósfera.

## Metodología

### Planeación y Diseño

Para la construcción de las 3 cámaras multialámbricas se usaron 3 tarjetas electrónicas de circuitos impresos. El diseño de estas tarjetas es exclusivo del Laboratorio de Partículas Elementales de la Universidad de Guanajuato. Para las dos cámaras de 10 canales el diseño consiste de una tarjeta electrónica de 10 cm x 10 cm con una abertura cuadrangular interna de 5 cm x 5 cm donde se montará una cámara de gas por la cual circulará el gas a ionizar, ésta será el área efectiva de detección de la cámara. Para la conexión de los ánodos o filamentos se realizaron perforaciones alrededor del área efectiva de detección, se consideraron 10 filamentos colocados 5 y 5 en forma de red, como cátodos se usaron dos placas de aluminio, con conexión a tierra por medio de 4 tornillos, colocadas en las tapas de la cámara de gas. Para la alimentación de los filamentos se incorporó al circuito de la tarjeta electrónica una conexión de alto voltaje. Mientras que para la salida de las señales detectadas se implementó un circuito para cada canal de detección, el circuito incorporó un capacitor y una resistencia para la señal de cada canal. Finalmente, para la lectura de las señales se usaron puertos RJ45 de 8 pines.

El diseño para la cámara de 15 cm consta de las mismas componentes mencionadas, pero con una tarjeta de 15 cm x 15 cm cuya sección efectiva para la detección es de 10 cm x 10 cm con 16 canales colocados 8 y 8 en forma de red. Estos dos diseños fueron modelados en 3D con ayuda del software SketchUp. Figura 4 y 5.

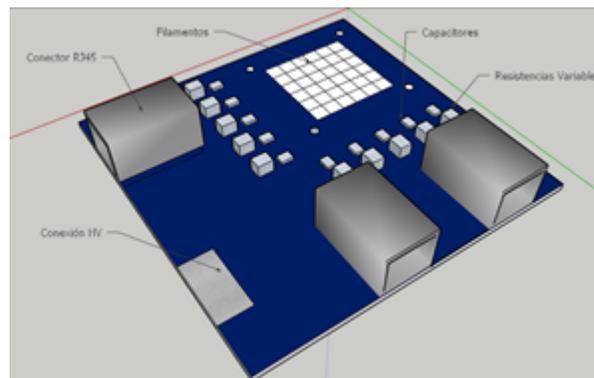


Figura 4. Modelo de la tarjeta de 10 cm x 10 cm.

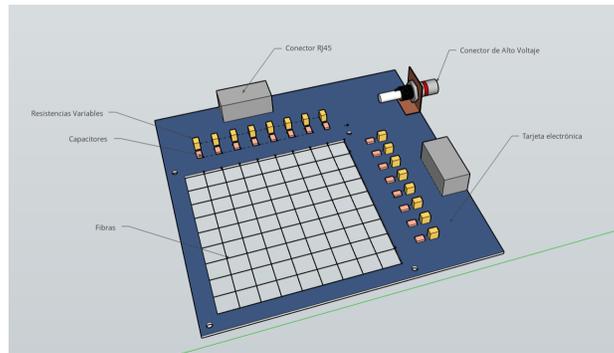


Figura 5. Modelo de la tarjeta de 15 cm x15 cm.

También se diseñaron 3 piezas para la construcción de la cámara de gas. Estas 3 piezas son los siguientes:

- Un marco cuadrado de plástico con un área exterior de 5 cm x 5 cm y un área interior de 3 cm x 3 cm.
- Un marco de plástico de las mismas dimensiones que el anterior, pero incorporando al diseño un tubo de plástico para la circulación del gas dentro de la cámara.
- Una placa cuadrangular de Aluminio de 5 cm x 5 cm para los electrodos del detector.

Para lograr una cámara herméticamente sellada se incluyeron 2 empaques en forma de marco para evitar fugas y lograr un sellado entre las piezas. El acomodo de las piezas se observa en la Figura 6. El diseño de la cámara montada se muestra en la Figura 7.



Figura 6. Diseño de las piezas para cámara de gas.

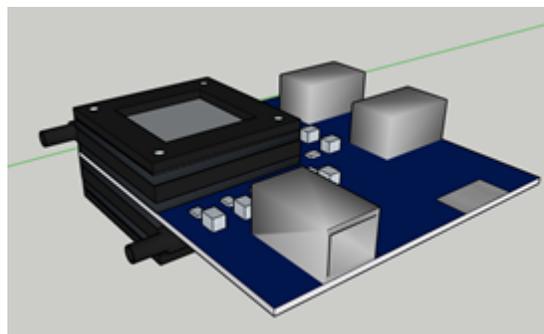


Figura 7. Diseño de la cámara de gas sobre la tarjeta.

## Montaje y Caracterización

La fabricación de las tarjetas electrónicas, con el circuito de detección, se realizó en una compañía de manufactura con el diseño propuesto. Esta tarjeta, junto con las piezas de la cámara de gas a ionizar fueron entregadas por la compañía a la cual fueron solicitadas.

Una vez que se tenía la tarjeta junto con las piezas se comprobó la conexión entre los diferentes componentes del circuito con ayuda de un multímetro, una vez comprobadas las conexiones se realizó el montaje de la cámara de gas con el fin de comprobar que las piezas enviadas fueran las correctas. Figura 8.



Figura 8. Montaje de la cámara de gas sobre la tarjeta.

No se encontró conexión entre los pines del conector RJ45, por lo que este tuvo que ser desoldado y fue cambiado por otro modelo de conector el cual no presentara estos problemas de conexión.

Se construyó el conector de alto voltaje con el cual se alimentará la tarjeta y los filamentos dentro de la cámara de gas. Para su construcción se cortó un tubo de cobre de 5/8 de diámetro; el cilindro cortado fue de 0.9 cm de altura. Esta pieza fue aplanada y desbastada.

La pieza fue perforada y doblada en forma de L, en la perforación circular se fijó un conector SHV. Finalmente se soldó la pieza en forma de L a la tarjeta electrónica. Entre el conector SHV y la conexión HV de la tarjeta se soldó una resistencia de 2 kΩ con el fin de disminuir la corriente eléctrica sobre el circuito. Figura 9.

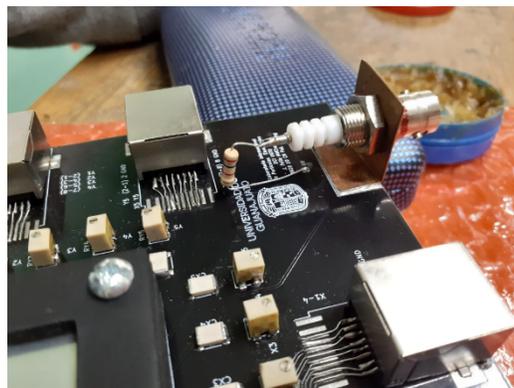


Figura 9. Conexión de alto voltaje con resistencia incorporada.

Se soldó una fibra de tungsteno recubierta de oro con diámetro de 0.00254 cm. Esta fibra fue soldada sobre uno de los canales de detección para así realizar las primeras mediciones para posteriormente soldar las otras fibras sobre los demás canales de detección.

La fibra fue tensada a 20 g y soldada comprobando que existiera conexión entre las componentes del circuito y la fibra, Figura 10. Una vez tensada la fibra se protegió ensamblando la cámara. El aire quedó dentro de ella y opera con éste.

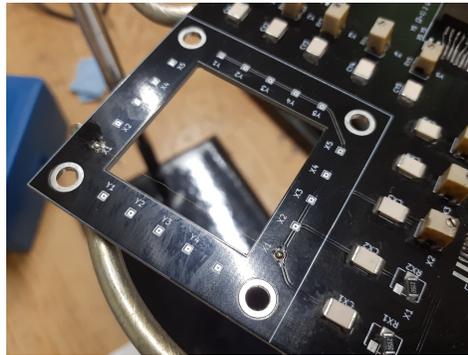


Figura 10. Fibra soldada sobre un canal de detección.

### Caracterización de Fuente de Alimentación

Para realizar las primeras mediciones fue necesario caracterizar la fuente de alimentación a usar. En esta ocasión se usó un amplificador de voltaje de diseño exclusivo del Laboratorio de Partículas Elementales. Este dispositivo permitió suministrar un alto voltaje en las 3 cámaras, Figura 11. Para caracterizar los voltajes de entrada y el voltaje de salida obtenido con el dispositivo fue necesario recolectar datos con ayuda de instrumentos de medición, a partir de estos datos se logró extrapolar los datos para obtener la curva de caracterización de dispositivo. Figura 12.

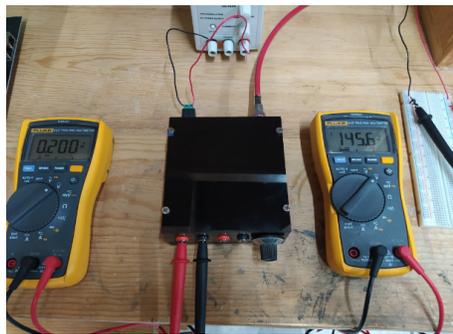


Figura 11. Amplificador de voltaje usado como fuente de alimentación.

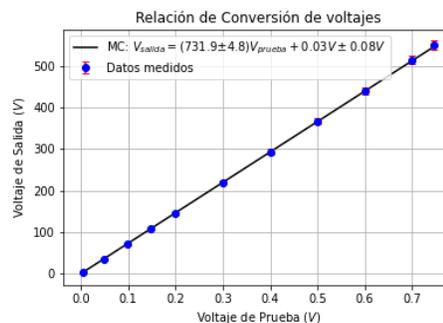


Figura 12. Curva de caracterización del amplificador de voltaje usado como fuente de alimentación.

Una vez obtenida la curva y la expresión matemática que describe la relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida fue posible realizar las primeras mediciones empezando por voltajes de salida de alrededor de 100 V.

## Resultados

A la cámara multilámbrica de 8 canales se le llama cámara 1; las cámaras de 5 canales, cámara 2 y cámara 3.

Se hicieron pruebas con diferentes resistencias en el circuito RC, además se probaron diferentes cables para capturar información. Todas las pruebas se realizaron en el canal X1. Para medir las señales se usó el osciloscopio Tektronix TDS 1001CEDU conectando el pin de tierra en el soporte de cobre para el conector de alto voltaje y el pin positivo se conectó a el pin número 2 del RJ45 correspondiente en la tarjeta electrónica.

### Cámara 1

La primera prueba se realizó con una resistencia en el conector de alto voltaje de 1000 ohm, una resistencia de 214.4 ohm en el circuito RC y un cable UTP categoría 5 de 40 cm. Se probaron voltajes de 100 V a 514 V, donde se obtuvieron señales en 494 V y 514 V. Figura 13.

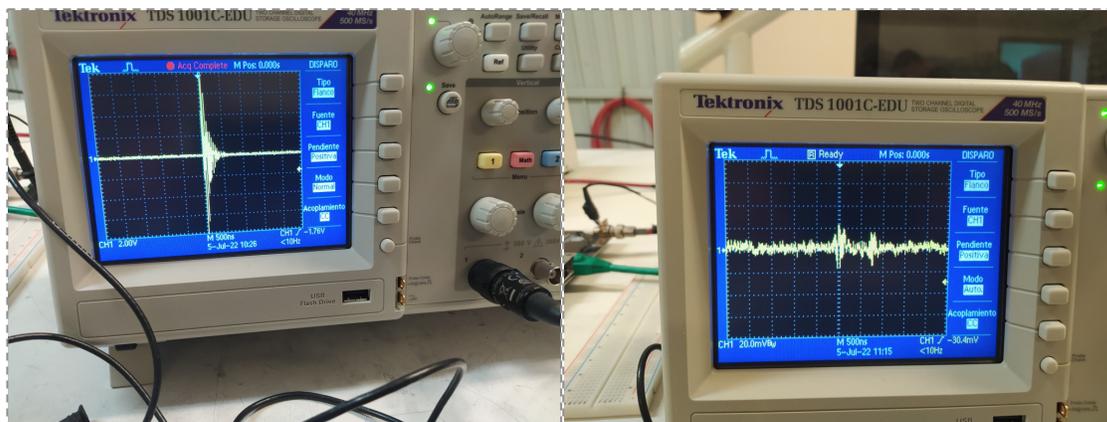


Figura 13. Izquierda: señal detectada en la prueba 1 con 514 V. Derecha: ruido observado en la prueba 1.

En esta prueba se detectaron señales con forma de oscilador armónico atenuado con amplitudes máximas de aproximadamente 10 V con tiempo de descarga de 500 ns (figura 13 izquierda). Además, se observó ruido en la señal (figura 13 derecha).

En la prueba 2 se midió con una resistencia en el conector de alto voltaje de 1000 ohm, una resistencia de 1000 ohm en el circuito RC y un cable UTP categoría 5 de 40 cm. En esta prueba se obtuvieron señales con 219 V, las señales tuvieron amplitudes máximas de aproximadamente 600 mV con tiempo de descarga de 500 ns. Se observó ruido similar al de la figura 13 y la señal tuvo la misma forma.

En la prueba 3 se midió con una resistencia en el conector de alto voltaje de 1000 ohm, una resistencia de 1000 ohm en el circuito RC y se conectó el osciloscopio directamente en el conector RJ45. Se probó con diferentes voltajes suministrados a la cámara, de 100 V a 260 V. En esta prueba se obtuvieron señales en 260 V. En esta prueba se detectaron señales con amplitudes máximas de aproximadamente 50 mV con tiempo de descarga de 200 ns. En esta prueba no se observó ruido como en las pruebas 2 y 3 la figura 13 y la señal tuvo la misma forma de oscilador armónico amortiguado, además, se obtuvo menos rebote de la señal. Figura 14.

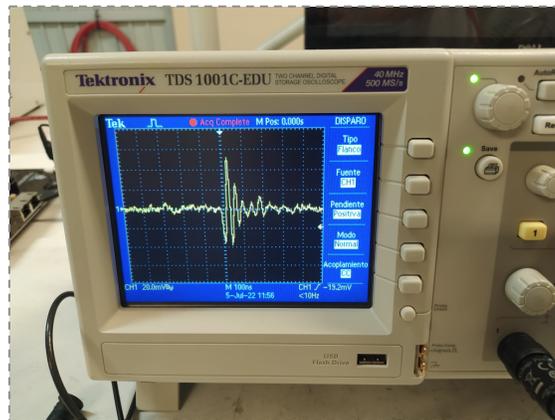


Figura 14. Señal detectada en la prueba 3 con 260 V.

En la prueba 4 se midió con una resistencia en el conector de alto voltaje de 1000 ohm, una resistencia de 411.8 ohm en el circuito RC y se usó un cable UTP categoría 6 de 20 cm de longitud. Variando el voltaje entre 100 V y 216 V se obtuvieron señales en las mediciones con 216 V que tuvieron amplitudes máximas de aproximadamente 150 mV con tiempo de descarga de 100 ns. En esta prueba se observó ruido similar al de la Figura 13, pero con menor amplitud y frecuencia y la señal tuvo la misma forma de oscilador armónico amortiguado, como en la Figura 14.

En la prueba 5 se midió con una resistencia en el conector de alto voltaje de 1000 ohm, una resistencia de 400 ohm en el circuito RC y se usó un cable UTP categoría 5 de 5 cm de longitud. Se hicieron pruebas suministrando desde 100 V y se observaron señales a partir de 474 V, en esta prueba se detectaron señales con amplitudes de aproximadamente 10 V con tiempo de descarga de 20  $\mu$ s. En esta prueba no se observó ruido y la forma de la señal fue de una descarga de capacitor o una caída exponencial. La frecuencia de observación de señales aumentó conforme se aumentó el voltaje, teniendo un voltaje de operación óptimo de 487 V. Figura 15.

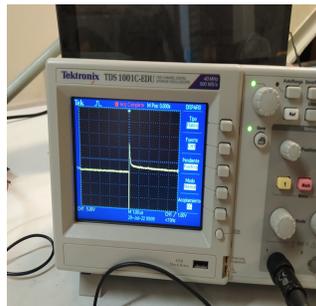


Figura 15. Señal detectada en la prueba 5 con 414 V.

## Cámara 2

Para la caracterización de la Cámara 2 se empleó una resistencia en el conector de alto voltaje de 2000 ohm, una resistencia de 214 ohm en el circuito RC y se usó un cable UTP categoría 5 de 5 cm de longitud. Se suministraron voltajes desde 100 V a 1000 V y se observaron señales a partir de 700 V con amplitudes de aproximadamente 7 V y tiempo de descarga de 0.2  $\mu$ s, en voltajes más altos se registraron señales con amplitudes más grandes y se observaron con una frecuencia muy alta. Bajo las condiciones mencionadas, se determinó el voltaje de operación óptimo como 700 V. Figura 16.

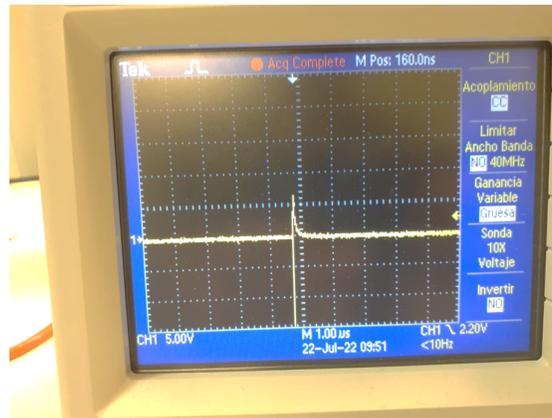


Figura 16. Señal detectada en la prueba con la cámara multialámbrica 2 a 700 V.

### Cámara 3

Para la Cámara 3 se empleó una resistencia en el conector de alto voltaje de 2000 ohm, una resistencia de 214 ohm en el circuito RC y se usó un cable UTP categoría 5 de 5 cm de longitud. Se suministraron voltajes desde 100 V a 1250 V y se observaron señales a partir de 400 V con amplitudes de aproximadamente 5 V y tiempo de descarga de 0.2  $\mu$ s, en voltajes más altos se registraron señales con amplitudes más grandes y se observaron con una frecuencia muy alta. Bajo las condiciones mencionadas, se determinó el voltaje de operación óptimo como 450 V. Figura 17.

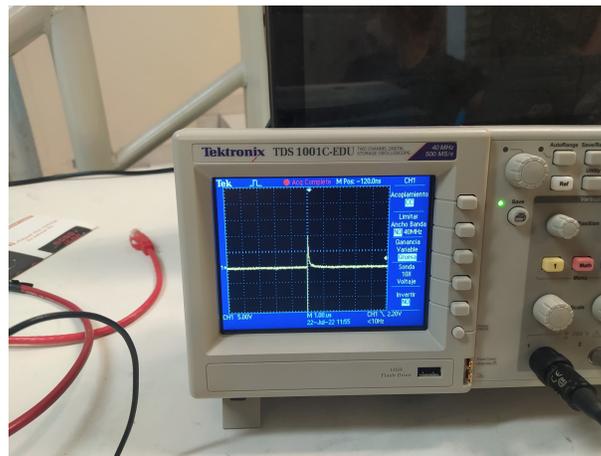


Figura 17. Señal detectada en la prueba con la cámara multialámbrica 3 a 450 V.

## Conclusiones

Durante la construcción de las cámaras se presentaron algunos problemas con el diseño del circuito, algunos de estos fueron los problemas de conexión en los conectores RJ45, los cuales tuvieron que ser removidos y sustituidos por otros conectores con dimensiones diferentes. Debido a esto las conexiones entre los canales de detección y los conectores tuvieron que realizarse superficialmente por medio de conexiones con alambres finos, esto podría estar ocasionando ruido en las señales leídas debido a que las conexiones no se encuentran aisladas de señales externas. Se conectó una resistencia de 2 k $\Omega$  en la fuente de alto voltaje y la cámara. Estas adecuaciones al diseño original mejoran la calidad de la señal detectada.

Las señales obtenidas, a pesar de tener la forma de una descarga de capacitor, presentan un pico en la señal

antes de la carga del capacitor, esto es ocasionado por un desacoplamiento en las impedancias del circuito RC y el osciloscopio, para corregir este problema es necesario cambiar la resistencia hasta acoplar la impedancia.

Las cámaras MWPC funcionaron de acuerdo a lo planeado.

Se obtuvieron señales de distintas amplitudes para las 3 cámaras multialámbricas.

## Referencias

- Charpak, George (1992). *ELECTRONIC IMAGING OF IONIZING RADIATION WITH LIMITED AVALANCHES IN GASES*. Nobel Lectures Physics 1991-1995, Editor Gösta Eksping, World Scientific Publishing Co., Singapore. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/charpak-lecture.pdf>
- Leon, William R. (1987). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Lausanne. Springer-Verlag.
- Knoll, Glenn F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*, third edition. John Wiley and Sons.
- Pierre Auger Observatory. (2021). *Cosmic Rays*. Recuperado 4 de junio de 2022, de <https://www.auger.org/component/content/category/126-cosmic-rays#section1>
- Charpak, G., & Sauli, F.. (1979). *Multiwire proportional chambers and drift chambers*. Nuclear Instruments and Methods, 162, 405-428. 08/07/2022, De CERN.
- Sauli, F. (1977). *Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers*. Ginebra, Suiza: CERN.
- Hess, V. (1936). *Unsolved Problems in Physics: Tasks for the Immediate Future in Cosmic Ray Studies*. Nobel Lectures, Physics 1922-1941, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1965.
- Abeysekara, A. U., et al. (HAWC, IceCube) (2019). Measurement of the Crab Nebula Spectrum Past 100 TeV with HAWC. *The Astrophysical Journal*, vol. 881, no. 2, 21 Aug. 2019, p. 134.
- Zyla, P A, et al. (Particle Data Group) (2020). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2020, No. 8, Aug. 2020.