

Planeación, diseño, construcción y caracterización de una cámara de ionización a base de tubos Geiger-Müller para detección de rayos cósmicos

Juan Emmanuel Rosas Trujillo, Julián Félix (Asesor)
División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato
je.rosastrujillo@ugto.mx
felix@fisica.ugto.mx

Resumen

Los rayos cósmicos son una fuente natural abundante de radiación ionizante y son de mucho interés científico en estos días para diferentes propósitos. Para detectar y estudiar éstos, planeamos, diseñamos, construimos y caracterizamos una cámara de ionización a base de tubos Geiger-Müller de 10 cm de largo y 1 cm de diámetro. Reportamos los detalles técnicos de la planeación, el diseño y la construcción y algunos resultados físicos de la caracterización de la cámara de ionización.

Palabras claves: Rayos Cósmicos, radiación ionizante, cámara de ionización, tubos Geiger-Müller.

Introducción

Rayos Cósmicos

En agosto de 1912, el físico austriaco Victor Hess realizó un histórico vuelo en globo que abrió una nueva ventana a la materia en el universo. Al ascender a 5.300 metros, midió la tasa de ionización de la atmósfera y comprobó que era tres veces superior a la del nivel del mar. Llegó a la conclusión de que la radiación penetrante entraba en la atmósfera desde arriba. Había descubierto los rayos cósmicos.

Estas partículas de alta energía que llegan del espacio exterior son principalmente (89%) protones -núcleos de Hidrógeno, el elemento más ligero y común del universo-, pero también incluyen núcleos de Helio (10%) y núcleos más pesados (1%), hasta el Uranio. Cuando llegan a la Tierra, chocan con los núcleos de los átomos de la atmósfera superior, creando más partículas, principalmente piones. Los piones cargados pueden decaer rápidamente, emitiendo partículas llamadas muones. A diferencia de los piones, éstos no interactúan fuertemente con la materia, y pueden viajar a través de la atmósfera para penetrar bajo tierra. La tasa de llegada de los muones a la superficie de la Tierra es aproximadamente uno por segundo por centímetro cuadrado.

Las partículas de rayos cósmicos de menor energía que golpean la tierra provienen de nuestra propia Vía Láctea. Pueden originarse, directa o indirectamente, a partir de las explosiones de supernovas que marcan la muerte de muchas estrellas. Estas explosiones arrojan campos magnéticos de rápido movimiento que reflejan partículas cargadas. Los núcleos de rayos cósmicos ganan energía cuando chocan con un reflector móvil. En un choque magnético, donde el campo magnético se ralentiza abruptamente, las partículas pueden quedar atrapadas entre dos reflectores. Como una pelota de ping-pong atrapada entre dos paletas convergentes, los núcleos hacen muchos reflejos, y la energía ganada en cada reflexión crece a medida que aumenta su energía. Este modelo de "aceleración de choque magnético" fue propuesto por primera vez por Enrico Fermi como una explicación para la aceleración de la mayoría de los rayos cósmicos. El proceso se ha observado en choques magnéticos en el viento solar que fluye desde nuestro sol, produciendo rayos cósmicos de energía modesta. Los campos magnéticos en movimiento más fuertes producidos en las explosiones de supernova podrían proporcionar la energía para la mayoría de los rayos cósmicos muy energéticos.

Las partículas de mayor energía guardan secretos sobre el origen de sus enormes energías, muchos millones de veces mayores que cualquier acelerador de partículas terrestres. El proceso de aceleración de Fermi proporciona una explicación para las energías de los rayos cósmicos tal vez tan altas como 10^{15} eV. Los procesos de aceleración para los rayos cósmicos de energías superiores no se entienden hasta estos días.

La evidencia observacional apoya la opinión de que los rayos cósmicos con energías de hasta aproximadamente 3×10^{18} eV se originan dentro de nuestra galaxia. Por encima de esta energía, la mayoría de los rayos cósmicos pueden provenir de fuera de la Vía Láctea. Los rayos cósmicos de mayor energía no son desviados mucho por los débiles campos magnéticos en nuestra galaxia, sin embargo, no llegan preferentemente desde el disco de la Vía Láctea o el lado del cielo hacia el centro de la galaxia. Esto sugiere fuertemente un origen extra galáctico. Aunque no hemos confirmado ninguna fuente en el cosmos que pueda producir tales energías, se han propuesto varias hipótesis. Estos incluyen puntos calientes de radiogalaxias y chorros de núcleos galácticos activos (AGN).

Cámaras de Ionización

A lo largo de los años se han desarrollado innumerables sistemas de detección de radiación para diversos propósitos. Las formas de detección de la radiación conocidos hasta ahora son dos: por detección de iones o por detección de fotones.

Una cámara de ionización es un detector gaseoso para medir la cantidad de ionización producida por una partícula cargada eléctricamente que atraviesa el volumen de gas. Las partículas neutras también pueden ser detectadas por este dispositivo a través de partículas cargadas secundarias resultantes de la interacción de las primarias con electrones o núcleos. Las partículas cargadas se miden separando los pares carga-transportador producidos por su ionización en un campo eléctrico y guiando los productos de la ionización hacia el ánodo o el cátodo, respectivamente, donde se pueden registrar las señales correspondientes. Si una partícula es totalmente absorbida en una cámara de ionización, este tipo de detector mide su energía.

Contadores Proporcionales

En las cámaras de ionización, la ionización primaria producida por la partícula incidente sólo se recoge a través del campo eléctrico aplicado. Sin embargo, si la intensidad del campo en alguna región del volumen del contador es alta, un electrón puede ganar suficiente energía entre dos colisiones para ionizar otro átomo. Entonces, el número de portadores de carga aumenta. En las cámaras cilíndricas, la intensidad de campo máxima se encuentra alrededor de los hilos de ánodo de diámetro fino, debido a la dependencia de $1/r$ del campo eléctrico.

Al igual que los tubos Geiger-Müller, los tubos proporcionales funcionan casi siempre en modo de pulso y se basan en el fenómeno de la multiplicación del gas para amplificar la carga representada por los pares de iones originales creados en el gas. Por lo tanto, los pulsos son considerablemente mayores que los de las cámaras de iones utilizadas en las mismas condiciones.

Tubos Geiger-Müller

El contador Geiger-Müller (comúnmente conocido como contador G-M, o simplemente tubo Geiger) es uno de los tipos de detección de radiación más antiguos que existen, ya que fue introducido por Geiger y Müller en 1928. Sin embargo, la simplicidad, el bajo coste y la facilidad de funcionamiento de estos detectores han hecho que se sigan utilizando hasta la actualidad.

Al igual que los contadores proporcionales, emplean la multiplicación del gas para aumentar la carga representada por los pares de iones originales formados a lo largo de la pista de radiación, pero de una manera fundamentalmente diferente. En el contador proporcional, cada electrón original da lugar a una avalancha que es básicamente independiente de todas las demás avalanchas formadas a partir de otros electrones asociados al evento ionizante original.

En el tubo G-M se crean campos eléctricos sustancialmente más altos que aumentan la intensidad de cada avalancha. En condiciones adecuadas, se crea una situación en la que una avalancha puede desencadenar por sí misma una segunda avalancha en una posición diferente dentro del tubo. A un valor crítico del campo

eléctrico, cada avalancha puede crear, en promedio, al menos una avalancha más, y se produce una reacción en cadena auto propagada.

Efecto Auger

Las partículas de rayos cósmicos golpean la atmósfera de la Tierra produciendo colisiones con las moléculas de aire, las cuales inician cascadas de partículas secundarias. Estos chubascos, generalmente, contienen millones de partículas que caen a la Tierra en un área grande. Un rayo cósmico de 10^{20} eV puede producir cascadas con millones de partículas que pueden cubrir un área de 16 km^2 .

Pierre Auger descubrió que, si se colocan dos detectores de partículas separados por varios metros de distancia, es posible tener eventos de detección simultáneos, es decir, encontró que hay partículas distribuidas en el espacio y que se pueden detectar al mismo tiempo, a este fenómeno se le conoce como Efecto Auger.

Metodología

Planeación

La cámara de ionización está basada en un arreglo de 10 tubos Geiger-Müller, colocados en posición paralela sobre una placa fenólica. La placa tiene una pista de Cobre y en ella montado un circuito eléctrico para hacer funcionar los tubos. Se usará un convertidor de bajo voltaje a alto voltaje para este propósito. Se detectará la radiación incidente sobre los tubos usando un osciloscopio conectado a las terminales de una resistencia de un circuito RC montado sobre la misma placa fenólica.

Diseño

La placa fenólica tiene dimensiones $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 0.16 \text{ cm}$. Se ha hecho una pista para montar el circuito eléctrico de la cámara de ionización. Véase Figuras 1 y 2.

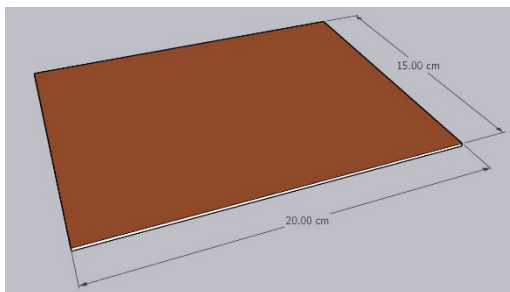


Figura 1. Placa fenólica. Diseño en SketchUp.

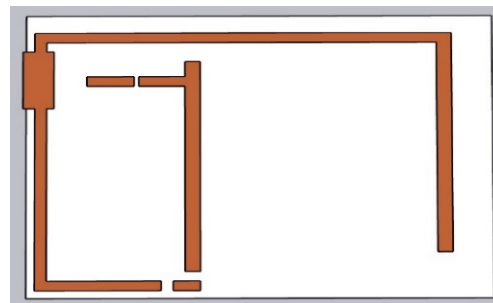


Figura 2. Pista para circuito. Diseño en SketchUp.

Los componentes que forman al circuito para hacer funcionar los tubos Geiger son los siguientes: 1 conector de alto voltaje y 1 resistor de 1000Ω para regular la corriente eléctrica. Véase Figuras 3 y 4.



Figura 3. Conector de Alto Voltaje.



Figura 4. Resistencia de 1000Ω .

Para el circuito RC se usarán los siguientes componentes: 1 capacitor de 47pF, 1 resistor de resistencia variable y 2 pines para conectar las terminales del osciloscopio. Véase Figuras 5, 6 y 7.



Figura 5. Capacitor.

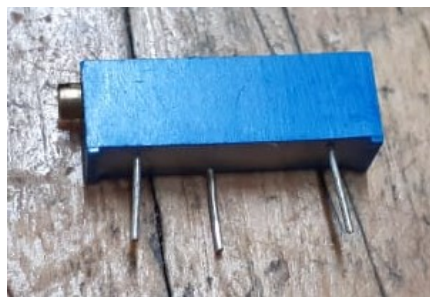


Figura 6. Resistor Variable.



Figura 7. Pines de Conexión.

Se usarán tubos Geiger modelo J305 para realizar la detección. Véase Figura 8.

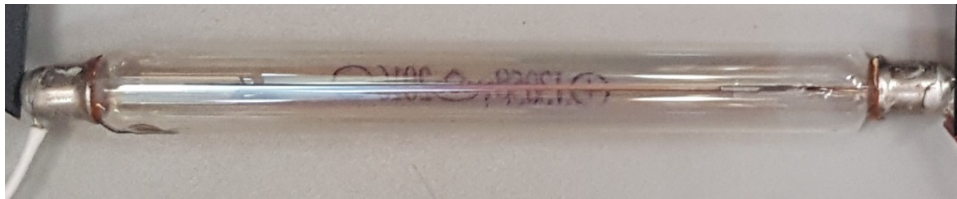


Figura 8. Tubo Geiger Müller J305.

Construcción

La superficie de cobre de la placa fenólica se limpió usando una lija de agua y acetona. Se cubrió con cinta adhesiva, se dibujó la pista y se recortó. Una vez retirada la cinta indeseada, la placa se colocó dentro de un contenedor con cloruro férrico ($FeCl_3$), posteriormente fue sellado, y se mantuvo durante 2 días en acción del compuesto para disolver el cobre en exceso y mantener sólo la parte de la pista. Véase Figura 9.



Figura 9. Pista de cobre.

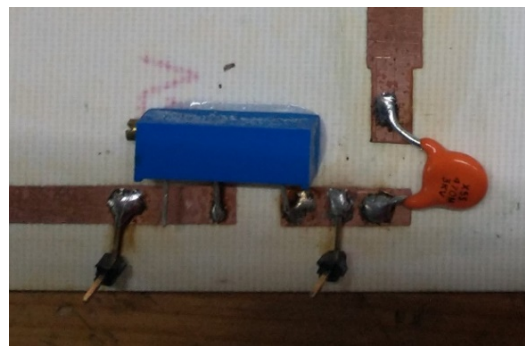


Figura 10. Circuito RC.

Los componentes del circuito RC se soldaron en la pista. Véase Figura 10.

Se soldaron las terminales internas del conector de voltaje a la pista y se montó el tubo Geiger sobre la placa pegando sus terminales a la pista con cinta de aluminio. Véase Figura 11. Se conectó un convertidor de bajo voltaje a alto voltaje tipo A SERIES modelo A30N-5 a los pines de conexión del conector. A las terminales del convertidor A30N-5 se conectó una fuente de control de voltaje que lo hace funcionar. Véase Figura 12.

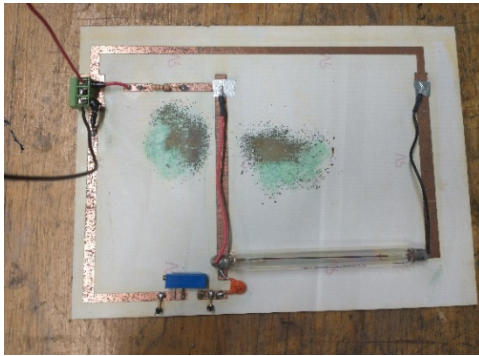


Figura 11. Circuito eléctrico con tubo Geiger.

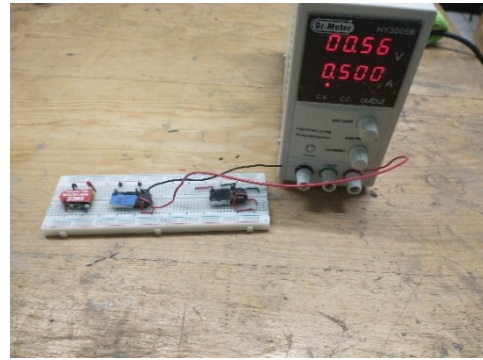


Figura 12. Convertido A30N-5 conectado a la fuente de control de voltaje.

El osciloscopio se conectó a los pines en los extremos del resistor variable para realizar las mediciones. Véase Figura 13.

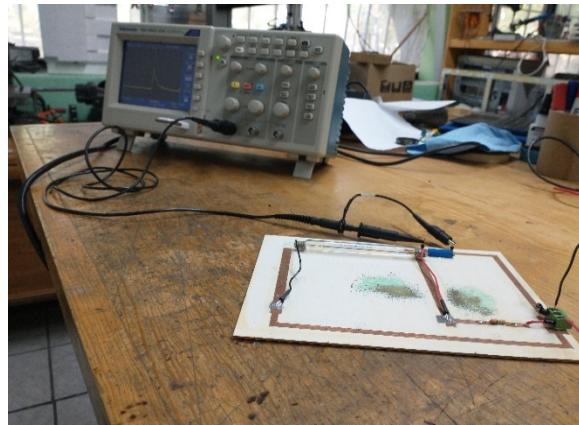


Figura 13. Osciloscopio conectado a las terminales del resistor en la cámara de ionización.

Funcionamiento

Cuando la radiación pasa por un gas, puede interactuar electromagnéticamente con el medio produciendo moléculas excitadas y moléculas ionizadas a lo largo de su trayectoria.

Después de la ionización de una molécula neutra, el ion positivo resultante y el electrón libre se denominan par de iones, y los cuales son constituyentes básicos de la señal eléctrica desarrollada por la cámara de iones. Los electrones liberados en el primer evento de ionización de la molécula pueden tener la energía suficiente para ionizar más moléculas y generar otros pares de iones. Este proceso es el principio bajo los que operan las cámaras de ionización, los contadores proporcionales y los tubos Geiger.

Para realizar la detección de la radiación que incide, es necesario recolectar los productos que genera tras el paso por el gas. Para los tubos Geiger, son los pares de iones. Pueden ser tanto los iones, o, los electrones libres. Sin embargo, ya que sólo la radiación no produce una señal lo suficientemente grande para detectarla, es necesario implementar campos eléctricos intensos dentro del gas con el propósito de multiplicar los pares de iones que produce la radiación. Para los gases, este proceso se le llama avalancha Townsend.

Es posible que una avalancha puede dar lugar a la generación de otra avalancha en un lugar distinto dentro del contador. Cuando el campo eléctrico alcanza un valor crítico, en promedio cada avalancha puede generar otra avalancha asociada, lo que resulta en un proceso exponencial que diverge rápidamente, lo

cual implica un valor muy alto de una descarga de Geiger. Sin embargo, para un valor máximo, el gas absorbe la energía (que se emite también en forma de fotones) y el proceso termina.

El tubo Geiger tiene una configuración que consiste en un cilindro aislado eléctricamente y un alambre conductor coaxial al eje del cilindro. De esta forma, es posible establecer un campo eléctrico y, por tanto, una diferencia de potencial entre la región comprendida por el cilindro y el alambre. Para nuestro caso, las polaridades se han escogido de tal manera que el alambre esté electrificado negativamente, mientras que la superficie del cilindro esté aterrizado a tierra. En consecuencia, la dependencia del campo eléctrico \vec{E} generado y la distancia radial r desde el alambre al punto de medición del campo es inversamente proporcional: $\vec{E} \propto \frac{\hat{r}}{r}$. Es decir, cuanto más cercano sea el punto de medición al alambre, mayor será el campo eléctrico; por el contrario, si el punto es más cercano a la superficie del cilindro, menor será el valor del campo. Además, puesto que el alambre tiene un diámetro pequeño, el campo eléctrico se intensifica aún más en puntos cercanos al alambre. Figura 14.

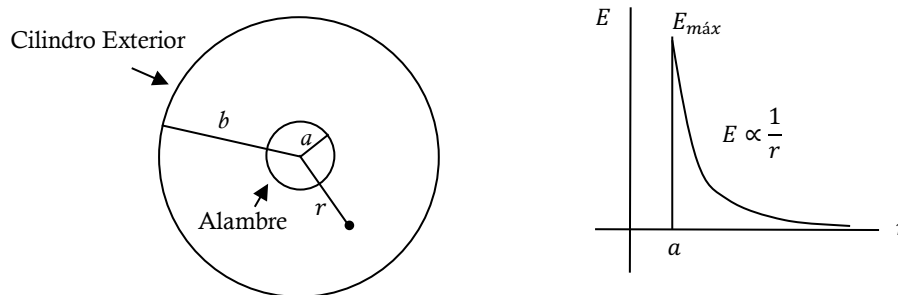


Figura 14. Esquema del tubo Geiger y el campo eléctrico.

Las expresiones para el campo eléctrico y el potencial electrostático se pueden obtener a partir del principio de Coulomb, de las condiciones $V(a) = V_0$ y $V(b) = 0$, y de la figura anterior, se tiene lo siguiente:

- Campo Eléctrico

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \frac{\hat{r}}{r}$$

- Potencial electrostático

$$V(r) = \frac{V_0 \ln\left(\frac{r}{b}\right)}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}$$

- Capacitancia

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

Cuando la radiación ioniza una molécula del gas y produce un par de iones, tanto el ion positivo como el electrón libre experimentan, por principio de Coulomb, una fuerza electrostática de atracción y repulsión, respectivamente, debido al campo eléctrico generado por el alambre. Siendo que el electrón tiene menor masa que el ion, éste tiene mayor aceleración y, por tanto, mayor energía cinética. El exceso de energía del electrón hace posible que al moverse y colisionar con las otras moléculas del gas las excite, o bien, las ionice, produciendo con esto último, un nuevo par de iones. El nuevo electrón liberado se acelera también y adquiere energía suficiente para ionizar otras moléculas, generando otros pares de iones. Este proceso se multiplica y tiene por consecuencia la producción de una avalancha.

Las moléculas excitadas decaen a su estado base emitiendo fotones. Estos fotones tienen energía suficiente para ionizar otras moléculas, y así producir nuevos pares de iones. De esta manera, las avalanchas se propagan en el volumen del gas. Figura 15.

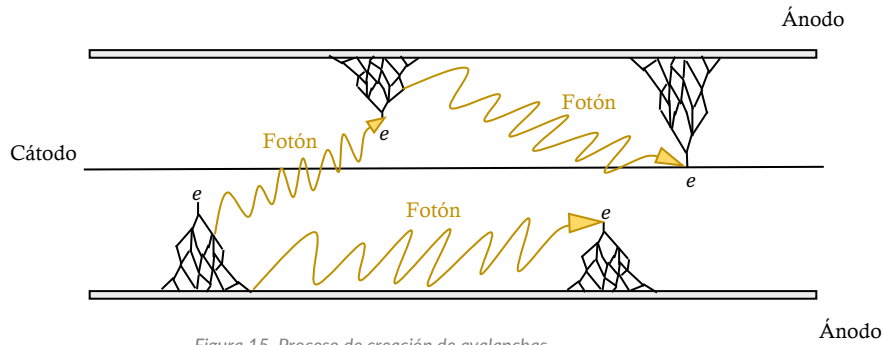


Figura 15. Proceso de creación de avalanchas.

Los iones positivos producidos por la ionización de las moléculas son atraídos y se mueven lentamente hacia el alambre. Su aceleración es menor debido a que tienen mayor masa que los electrones. Cuando llegan a la superficie del alambre, son drenados rápidamente hacia la placa de un capacitor de un circuito RC conectado al tubo Geiger. Una vez que el capacitor se carga por completo, se descarga a través del resistor conectado a una de sus terminales. Esta descarga se mide a través de un osciloscopio conectado a las terminales del resistor. Véase Figura 16.

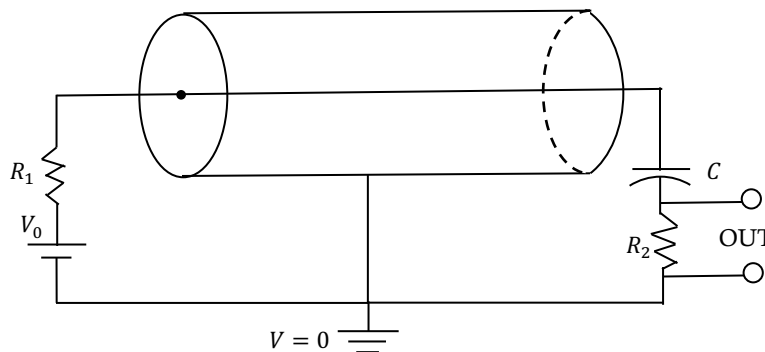


Figura 16. Circuito eléctrico mínimo para el funcionamiento del tubo Geiger.

Cuando el proceso de avalancha en el gas termina, el tubo entra en un estado inactivo. Debe pasar un tiempo para que los iones y electrones que quedan dentro del gas se recombinen, el gas regrese a su estado inicial, y así el tubo vuelva a estar en estado activo para una nueva detección.

Operación y Caracterización

Mostramos el esquema de conexión de la cámara de ionización. Véase Figura 17.

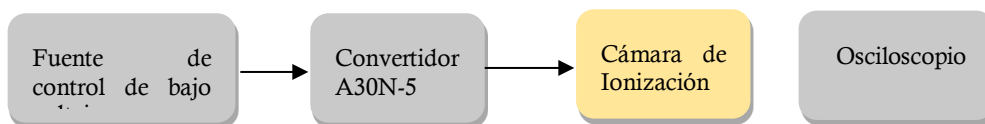


Figura 17. Diagrama de Bloques de conexión del sistema experimental.

Antes de realizar observaciones de las señales en el osciloscopio producidas por las descargas en el tubo Geiger, se caracterizó el convertidor A30N-5. Se aplicaron voltajes al convertidor con la fuente de control de bajo voltaje en un rango de 0.5 V a 1.1 V, midiendo el voltaje de salida del convertidor con un multímetro.

Los resultados se presentan en la siguiente gráfica. Véase Figura 17.

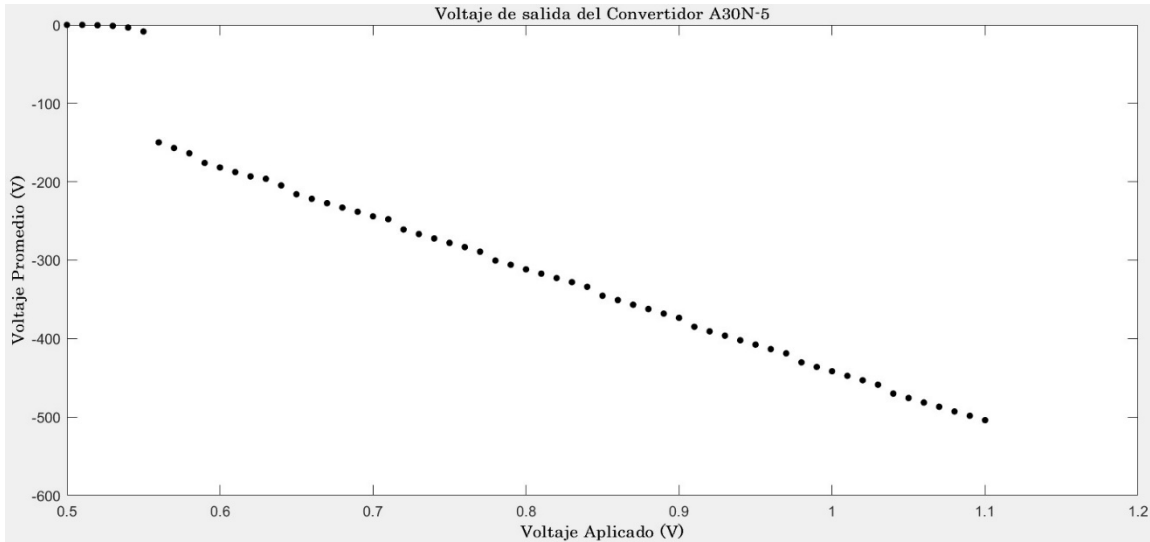


Figura 17. Relación entre el voltaje entregado por el convertidor A30N-5 y el voltaje aplicado. Las barras de error son del orden de 5% del valor de la medida. Voltajes más altos se obtienen por extrapolación.

Resultados

Se registraron pulsos en el osciloscopio con un voltaje de la fuente de control de 0.82 V, equivalentes a un voltaje de aproximadamente 320 V en la salida del convertidor A30N-5. La forma de las señales es tanto de pulsos simples como de pulsos superpuestos. Véase Figuras 17 y 18.

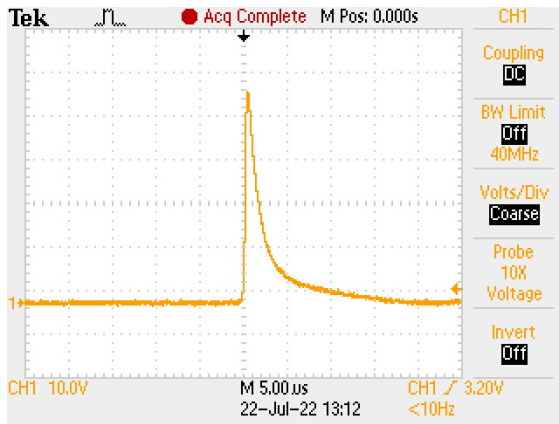


Figura 17. Pulso simple en osciloscopio.

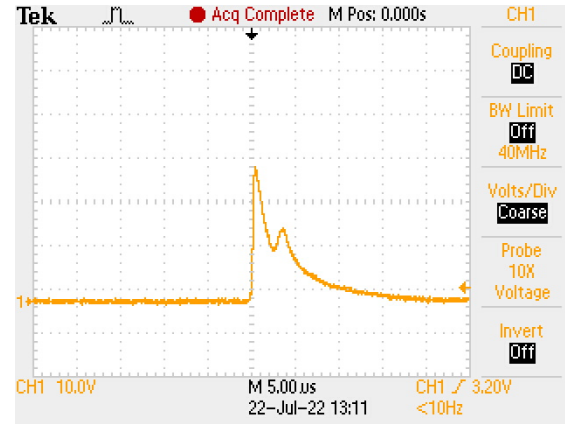


Figura 18. Pulsos superpuestos en osciloscopio.

La forma de la señal en la Figura 18 se debe al paso de una segunda partícula justo en el lapso cuando el capacitor se descarga a través del resistor. Una nueva descarga se almacena en el capacitor y se suma a una fracción de la primera.

Conclusiones

La cámara con un tubo funcionó satisfactoriamente.

Las señales registradas corresponden a la descritas por un circuito RC, como se esperaba.

Hubo evidencia de un mayor número de señales correspondientes a pulsos simples que a pulsos superpuestos. Estos últimos fueron raros y escasos.

Agradecimientos

A todo el equipo de este proyecto por su paciencia, apoyo y compromiso y así como a la Universidad de Guanajuato por brindarnos el lugar, recursos, material y herramientas necesarias para poder llevar a cabo esta etapa del proyecto.

Referencias

- [1]Pierre Auger Observatory. (2021). A Timeline of High-Energy Cosmic Rays History. <https://www.auger.org/outreach/cosmic-rays/timeline-cosmic-rays>
- [2]CERN. (S.F). Cosmic rays: particles from outer space. <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>
- [3]Knoll, Glenn F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. Third Edition. John Wiley and Sons.
- [4]Sauli, F. (2014). *Gaseous Radiation Detectors Fundamentals and Applications*. Ginebra, Suiza. CERN.
- [5]Gruppen, C. (2008). *Particle Detectors*. Second Edition. Cambridge University Press. USA.