



División de Ciencias e Ingenierías Campus León
Universidad de Guanajuato

**PLANEACIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y
TRAZADO DE RAYOS CÓSMICOS**

T E S I S

Que para obtener el grado de
Licenciatura en Ingeniería Física

Presenta

José Francisco Ambriz Gutiérrez

Director de Tesis:

Dr. Julian Félix Valdez

Autorización de la versión final

Esta tesis es para mí, para mostrarme un poco de todo lo que soy capaz de hacer y de lo que puedo llegar a lograr, para que no me rinda y busque el camino que me mantenga feliz, no el que cumpla con las expectativas sociales si no las mías, para que me dé cuenta de lo útil que puedo ser para el progreso de la sociedad e impulsarme a buscar siempre un mundo mejor.

Agradecimientos

A mis padres, por todo el apoyo brindado durante mi carrera en Ingeniería Física, las charlas motivacionales para que no me rindiera a pesar de la ansiedad generada durante el tiempo de confinamiento.

A mis compañeros, por jamás juzgarme y brindarme su apoyo con discusiones, mesas de ayuda y asesorías.

A mis amigos, por siempre confiar en mi e invitarme a seguir cuando más lo necesitaba.

A Fati, por motivarme a convertirme en un excelente ingeniero todos los días y mantenerse curiosa a escuchar todo en lo que me encontraba trabajando en ese momento.

A mis Profesores, por tomarse el tiempo de aclarar mis dudas, por siempre tener una excelente disposición de ayuda y por ser grandes ejemplos.

A mi asesor, por brindarme una excelente orientación y un gran ejemplo en cuanto al proceso científico se refiere, por proporcionar todos los materiales necesarios para la realización de este proyecto, por mantener siempre una actitud de disposición para que yo aprenda de manera correcta y por dar su tiempo incluso en temporada fuera del calendario académico de la universidad.

Finalmente, agradezco a la Universidad de Guanajuato y a todos sus colaboradores por todos los apoyos brindados durante mi carrera universitaria.

Resumen

La radiación cósmica consiste de partículas de altas energías cuyo origen se encuentra más allá de la Tierra; su origen exacto no es muy conocido debido a que las trayectorias de los rayos cósmicos no son en línea recta, puesto que las partículas de radiación cósmica normalmente se encuentran cargadas eléctricamente e interactúan con los campos electromagnéticos del medio interestelar. Mediante el estudio de dicha radiación sabemos un poco más sobre el cosmos debido a que es una forma revolucionaria de observarlo. Para contribuir a estos estudios, planeamos, diseñamos, construimos y caracterizamos un prototipo original para detectar rayos cósmicos y trazar sus trayectorias. Está construido a base de tubos Geiger-Müller hechos de latón de 10 cm de longitud y 1/2 in de diámetro, en su interior a lo largo de su eje tienen una fibra de Tungsteno recubierto de oro en la que aplicamos alto voltaje para generar cascadas de ionización. Consta de 6 tubos apilados formando un triángulo de Pascal para mapear la incidencia de rayos cósmicos reconstruyendo las trayectorias con la información obtenida en cada tubo. Funciona con voltajes cercanos a 1600 V presentando señales de 50 a 200 mV. También desarrollamos un algoritmo para medir los ángulos de incidencia de los rayos cósmicos usando los tiempos de detección y la geometría del dispositivo. Presentamos detalles técnicos de la planeación, el diseño, la construcción, la caracterización, y resultados físicos preliminares de la operación de este detector.

Palabras clave: Radiación cósmica, ionización, trayectoria, detección, campo eléctrico, centelleo, fotonización.

Abstract

Cosmic radiation consists of high energy particles whose origin is beyond the Earth; its exact origin is not well known because the trajectories are not in a straight line, since the cosmic radiation particles are normally electrically charged and interact with the electromagnetic fields of the interstellar medium. By studying this radiation we know a little more about the cosmos because it is a revolutionary way of observing it. To contribute to these studies, we plan, design, build, and characterize an original prototype to detect cosmic rays and trace their trajectories. It is built on the basis of Geiger-Müller tubes made of brass 10 cm long and 1/2 in in diameter, inside along its axis they have a gold-coated tungsten fiber in which we apply high voltage to generate ionization cascades. It consists of 6 stacked tubes forming a Pascal's triangle to map the incidence of cosmic rays, reconstructing the trajectories with the information obtained in each tube. It works with voltages close to 1600 V presenting signals from 50 to 200 mV. We also developed an algorithm to measure the incidence angles of cosmic rays using detection times and device geometry. We present technical details of planning, design, construction, characterization and operation preliminary physical results of this detector.

Keywords: Cosmic radiation, ionization, trajectory, detection, electric field, scintillation, photonization.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
1. Introducción	1
1.1. Organización de la tesis	1
2. Esquema conceptual	3
2.1. Radiación Cósmica	3
2.1.1. Tipos de radiación cósmica	3
2.2. Formas de detectar radiación.	4
2.2.1. Ionización	4
2.2.2. Fotonización	8
2.3. Veto detectores	11
2.4. Circuito eléctrico	11
2.4.1. Ley de Ohm	11
2.4.2. Circuito RC	14
3. Sistema de detección de rayos cósmicos	17
3.1. Planeación	17
3.2. Diseño	19
3.2.1. Diseño de circuito eléctrico	22
3.3. Construcción	24
3.4. Caracterización	31
3.5. Simulación de funcionamiento	38
3.6. Toma de datos	43
3.7. Resultados	43
4. Sistema de trazado de rayos cósmicos	55
4.1. Posición en eje z.	56
4.2. Ángulo de incidencia	58
5. Discusión y conclusiones	67

6. Trabajo Futuro

69

A. Anexos

72

Índice de figuras

2.1.	Diagrama ilustrativo de cascada de ionización en un medio gaseoso con un campo eléctrico suficientemente grande. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	7
2.2.	Diagrama de Jablonski en el que se muestra el momento de la emisión de luz en los estados de excitación de un átomo. Se excluye la sección de cruces de intersistema y fosforescencia. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	9
2.3.	Ilustración de un material conductor con un campo eléctrico aplicado. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	12
2.4.	Diagrama ilustrativo de circuito RC. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	14
3.1.	Diagrama ilustrativo de la primer aproximación del trazado de trayectorias de los rayos cósmicos. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	19
3.2.	Ilustración del arreglo piramidal de tubos. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	19
3.3.	Diseño de los cabezales en donde se situarán lo tubos. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	20
3.4.	Diseño del dispositivo con el circuito eléctrico montado. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	21
3.5.	Diseño de bases para situar los veto detectores. En azul se encuentran las bases y en negro el veto detector. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	21
3.6.	Diseño del Sistema de Detección y Trazado de Radiación Cósmica. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	22
3.7.	Circuito eléctrico propuesto para un solo tubo detector. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	23
3.8.	Circuito eléctrico a montar en las tarjetas electrónicas. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	23
3.9.	Tarjetas electrónicas diseñadas. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	24
3.10.	Imagen de dos tubos ya cortados y limpiados exhaustivamente. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	25

3.11. Fotografía de la impresora 3D utilizada en la construcción del dispositivo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	25
3.12. Se muestran los tubos montados en la base con los cabezales impresos en 3D. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	26
3.13. Paquete del carrete de fibras de oro y tungsteno utilizadas en la construcción del dispositivo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	26
3.14. Se muestran las fibras introducidas en los tubos del dispositivo, con un pedazo de cinta masking en la punta para mantenerlas fijadas al papel. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	27
3.15. Tarjetas electrónicas sin componentes electrónicos montados. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	28
3.16. En la primera imagen, se muestran las tarjetas electrónicas con todos los componentes montados en la superficie. En la segunda imagen, se muestra la tarjeta de lectura con un recubrimiento acrílico para evitar descargas no deseadas. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	29
3.17. Se muestra el dispositivo con una de las tarjetas electrónicas siendo montada, para así proceder al tensado de fibras. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	29
3.18. Se montó el dispositivo de manera vertical con ayuda de una prensa, para realizar el tensado de fibras a 20 g. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	30
3.19. Imágenes de las diferentes vistas del dispositivo final, listo para iniciar pruebas de detección. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	30
3.20. En la tarjeta electrónica se muestra la disposición de los 6 canales del dispositivo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	31
3.21. Montaje realizado para caracterizar el dispositivo. Únicamente conectamos un canal pues la caracterización debe ser para cada tubo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	32
3.22. Fuente utilizada para aplicar alto voltaje en el dispositivo experimental. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	32
3.23. Señal observada para el canal 6 con un voltaje de operación de -1060 V. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	33
3.24. Cortamos los footprints en las tarjetas electrónicas para separar eléctricamente las fibras, después soldamos un cable individual a cada canal con la finalidad de conectar cada uno a un circuito externo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	34
3.25. Montaje experimental con circuito externo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	34
3.26. Montaje experimental con circuito externo, se encuentra en funcionamiento el canal 6 a un voltaje de -1700V. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	35
3.27. Ejemplos de señales eléctricas obtenidas en cada canal operando con un voltaje de -1700V. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	35

3.28. Diseño de circuito eléctrico modificado. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	36
3.29. Circuito modificado montado en protoboard. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	36
3.30. Prueba de sondeo en dos canales simultáneos cambiando el trigger de canal. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	37
3.31. Se muestran las imágenes de la geometría efectiva del dispositivo. Los dos plásticos centelladores en los extremos superior en inferior con un pequeño fotodiodo cada uno (pequeño prisma rectangular). En la parte central, los tubos detectores tipo Geiger-Müller rellenos con una mezcla de argón (95 %) y metano (5 %). <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	39
3.32. Se muestran las líneas de campo eléctrico para la geometría del dispositivo, el campo es más intenso en el color azul y de menor intensidad en el color rojo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	39
3.33. Gráfico de emisión del plástico centellador previsto para el dispositivo. [13]	40
3.34. Simulación con todas las propiedades ópticas de los veto-detectores y un muón atravesando ambos volúmenes efectivos. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	41
3.35. Incidencia de fotones dentro de los foto-diodos de los veto-detectores. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	41
3.36. Se notan algunos electrones generados en una corrida de la simulación (desactivando las propiedades ópticas) en color rojo, mientras que los muones de prueba se muestran en color azul. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	42
3.37. Tabla utilizada para la toma de datos para un solo canal. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	43
3.38. Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación en el canal 6. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	44
3.39. Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación, canal 6. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	45
3.40. Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 6. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	45
3.41. Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación, canal 5. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	46
3.42. Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 5. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	47
3.43. Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 5. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	47

3.44.	Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación, canal 4. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	48
3.45.	Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 4. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	49
3.46.	Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 4. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	49
3.47.	Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación, canal 2. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	50
3.48.	Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 2. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	50
3.49.	Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 2. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	51
3.50.	Se muestran las frecuencias de todas las mediciones realizadas para los cuatro tubos funcionales en el dispositivo junto con una línea que ilustra un comportamiento de máximos y mínimos cada 50 mV. Las mediciones fueron tomadas en días distintos. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	52
3.51.	Señales acopladas observadas en el canal 4 operando con $V=-1700$ V. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	53
4.1.	El rayo cósmico incidente tiene una proyección en los planos XY y ZY, si obtenemos los ángulos de dichas proyecciones, los ángulos de incidencia en el dispositivo. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	55
4.2.	Se muestra la vista lateral de uno de los tubos con un rayo cósmico incidente que desencadena un evento de ionización enviando una señal por la fibra. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	56
4.3.	Se muestra la proyección del rayo incidente en el plano XY. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	59
4.4.	En verde podemos ver las cuerdas que buscamos aproximar en el análisis, al obtener una recta aproximada de ambas, obtendremos un ángulo aproximado de incidencia en el plano XY. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	59
4.5.	Para parametrizar el sistema tenemos los vectores \vec{r} y \vec{C} . El vector \vec{r} es el vector del origen a un punto sobre la circunferencia, el vector \vec{C} indica en donde se sitúa el centro de la circunferencia. El vector \vec{R} es el vector del radio de la misma, \vec{L} es el segmento de la trayectoria que nos interesa inferir, finalmente \vec{x}_0 y \vec{x} que son los vectores que indican los extremos de \vec{L} . <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	60
4.6.	Mapa de puntos creado con los puntos aleatorios x_0 y sus respectivos x . <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	63

4.7.	Gráficos con las trayectorias construidas con un error máximo de 4 grados y los pares ángulo pendiente de cada recta. Para $L_1 = L_2 = 2R$. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i>	64
4.8.	Gráficos con las trayectorias construidas con un error máximo de 4 grados y los pares ángulo pendiente de cada recta. Para $L_1 = 1.54R$ y $L_2 = 1.45R$. <i>Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.</i> . . .	65

Capítulo 1

Introducción

En 1908, Hans Geiger introdujo con éxito el primer detector de partículas alfa individuales. En 1925 se unió a Walther Müller y mejoraron la sensibilidad, el rendimiento y la durabilidad del contador; se le conoció como el "Contador Geiger-Müller". Podría detectar no solo partículas alfa, sino también partículas beta y fotones ionizantes. [1]

El dispositivo obtiene señales eléctricas debido a las cascadas de ionización generadas al incidir una partícula con suficiente energía en la mezcla de gases depositada dentro del tubo, a dicho fenómeno se le conoce comúnmente como "cascada de Townsend" debido al científico que lo descubrió. Una vez generados los iones, éstos se recolectan por medio de una fibra puesta a un potencial eléctrico alto, ya sea positivo o negativo, de modo que al sumar la carga de todos los iones colectados obtendremos una señal con la cual sabemos que alguna partícula de radiación ha cruzado por el tubo.

1.1. Organización de la tesis

En el desarrollo de este trabajo de tesis, recordaremos los conceptos principales que son necesarios para el desarrollo de un prototipo de detector de radiación ionizante que nos permite reconstruir las trayectorias de las partículas incidentes. Exploraremos los diferentes tipos de tecnología utilizados para la detección por medio de fotonización o ionización, así como el circuito eléctrico básico que se utiliza para

obtener señales eléctricas debido al paso de partículas, todo repasando los principios físicos básicos que permiten el funcionamiento de la tecnología. Capítulo 2.

En el capítulo 3 mostraremos el proceso de planeación, diseño, construcción y caracterización del prototipo antes mencionado con todos los resultados experimentales obtenidos mostrando el funcionamiento correcto de la tecnología. También agregamos un apartado extra en el cual se muestran los resultados de una simulación realizada del dispositivo de detección para lograr obtener una comparación con los resultados experimentales y discutir si el dispositivo funciona adecuadamente.

El capítulo 4 está dedicado al desarrollo del sistema para reconstruir las trayectorias de las partículas incidentes, ahí mostramos el modelado matemático para el algoritmo y se realizan las pruebas del funcionamiento del mismo.

Para concluir con el trabajo de tesis está el capítulo 5 en donde discutimos los resultados obtenidos y damos algunas conclusiones. En el capítulo 6 exponemos el trabajo que se requiere realizar en el futuro para mejorar los resultados del proyecto.

Capítulo 2

Esquema conceptual

2.1. Radiación Cósmica

En el año de 1912 el físico de Austria, Víctor Hess realizó el famoso vuelo en globo que cambió para siempre nuestra manera de ver el universo. A medida que ascendía a 5.3 km, pudo medir la tasa de ionización en la atmósfera terrestre descubriendo que era alrededor de 3 veces la del nivel del mar. Fue así como concluyó que mucha de la radiación penetrante entraba a la atmósfera desde arriba. Víctor Hess había descubierto los rayos cósmicos.[2]

Comenzar a estudiar los rayos cósmicos nos ha abierto la puerta al estudio de las partículas más allá de sólo el átomo ya que se descubrieron diversos tipos de partículas solo con el estudio de la radiación cósmica lo que dio pie a que se construyeran los primeros aceleradores de partículas hasta la década de 1950.[2]

2.1.1. Tipos de radiación cósmica

Las partículas de altas energías que llegan desde el espacio son principalmente protones, repartidos en núcleos de hidrógeno (89 %), núcleos de helio (10 %) y otros núcleos más pesados (1 %). [2]

Los rayos cósmicos normalmente no llegan a tocar la superficie terrestre si no que

interactúan con la materia de la atmósfera generando nuevas partículas que a su vez interactúan nuevamente con la materia, generando así lluvias de partículas que se mueven hacia la superficie y cuyas partículas resultantes detectaremos en el laboratorio.

La mayor parte de las partículas que se obtienen en la atmósfera son los llamados piones (π , hay neutros y con los dos tipos de carga, son mesones). Los piones neutros se desintegran muy rápidamente en rayos gamma. Los piones cargados también se descomponen pero les lleva un poco más de tiempo, por lo tanto los piones pueden chocar con otro núcleo de los átomos en la atmósfera y generar más partículas. Los piones cargados decaen en un muón (μ) y un neutrino (ν) que no interactúan fuertemente con la materia y por lo tanto pueden llegar hasta la superficie y penetrar la misma. Los rayos gamma producidos por los piones neutros también pueden producir partículas de su interacción con los núcleos de aire contribuyendo a las cascadas de partículas generadas por radiación cósmica. [2][3] Normalmente nos centramos en detectar muones debido a que se pueden crear en las capas superiores de la atmósfera y llegar hasta la superficie terrestre. Si obtenemos la trayectoria de éstos, posiblemente obtengamos los puntos de incidencia de los rayos cósmicos.

2.2. Formas de detectar radiación.

En el dispositivo desarrollado en este proyecto de Tesis se utiliza la tecnología de las dos formas conocidas para la detección de partículas, la detección por ionización y la detección por fotonización.

2.2.1. Ionización

Los detectores de ionización fueron los primeros dispositivos eléctricos desarrollados para la detección de radiación. Estos instrumentos se basan en la captación directa de los electrones o iones de la ionización producida en un gas al pasar la radiación.[4]

Entre los primeros desarrollos se encuentran la cámara de ionización, el contador

proporcional y el contador Geiger-Müller, que es el detector en el cual se basa el dispositivo desarrollado en este trabajo de tesis. Luego de 1960 se desarrolló la cámara multialámbrica mediante la cual se podía obtener la posición de las partículas con algunos milímetros de precisión. [4]

A un ion se le conoce como alguna partícula que tiene un estado de carga eléctrica, como podría ser un átomo que perdió un electrón y por ello quedó cargado positivamente, o un electrón libre. Como sabemos, existen dos tipos de carga eléctrica por lo que tendremos dos tipos de iones.

Los iones positivos se pueden crear utilizando electrones, fotones o contacto de superficies que proporcione la energía necesaria para la ionización. A nosotros nos interesa el estudio de la formación de iones utilizando el bombardeo de electrones o incluso muones constituyentes de los rayos cósmicos. El proceso de producción de iones positivos se puede describir de la siguiente manera:



donde X simboliza un átomo con carga neutra, p alguna partícula de las mencionadas anteriormente con la suficiente energía para producir la ionización (liberar un electrón e) y los súper-índices indican el tipo de carga eléctrica del objeto al que se refiere.

Para producir iones negativos existen varios cambios físicos o físico-químicos. Así como procesos de impacto de electrones, intercambio de carga eléctrica en metales y en superficies. En comparación con la producción de iones positivos, existe una gran variedad de procesos posibles. Sin embargo, para efectos de esta tesis lo que nos interesa es la producción de iones positivos debido a que se obtienen electrones en el proceso.[5]

Detector Geiger-Muller

Supongamos que tenemos un medio gaseoso cuyos átomos tienden a ionizarse (ceder electrones) fácilmente. Ahora supongamos que un rayo cósmico incide en el medio, tendremos el proceso descrito en la expresión [2.1]. Ahora apliquemos un campo eléctrico lo suficientemente grande para acelerar el electrón formado en el medio gaseoso, cuando el electrón tenga la energía suficiente al colisionar con otro átomo obtendremos otro ion con el proceso siguiente



De modo que los dos electrones resultantes pasarán por el mismo proceso y a la larga se generarán n iones positivos, pero a su vez 2^{n-1} electrones. A este proceso se le llama "Cascada de Townsend" y es el principio observacional por el cual funcionan los detectores Geiger-Müller.

Un detector Geiger-Müller consiste en un tubo que lleva una fibra metálica coaxial conductora de electricidad; el tubo normalmente se rellena de un medio gaseoso para facilitar la formación de iones. Se aplica un alto voltaje entre la fibra y el tubo formando así un campo eléctrico radial con la fibra eléctrica en el centro de modo que al incidir un rayo cósmico se genere la cascada de ionización antes mencionada, también hay tubos Geiger en los cuales sólo se aplica voltaje a la fibra. [2.1].

Así pues, un tipo de iones (depende como elijamos el cátodo y el ánodo) llegará a la fibra y se obtendrá una señal eléctrica considerable. Como mayormente se generan electrones, que iones positivos porque un mismo átomo puede ser ionizado más de una vez, uno esperaría señales más grandes con iones negativos (electrones). [6]

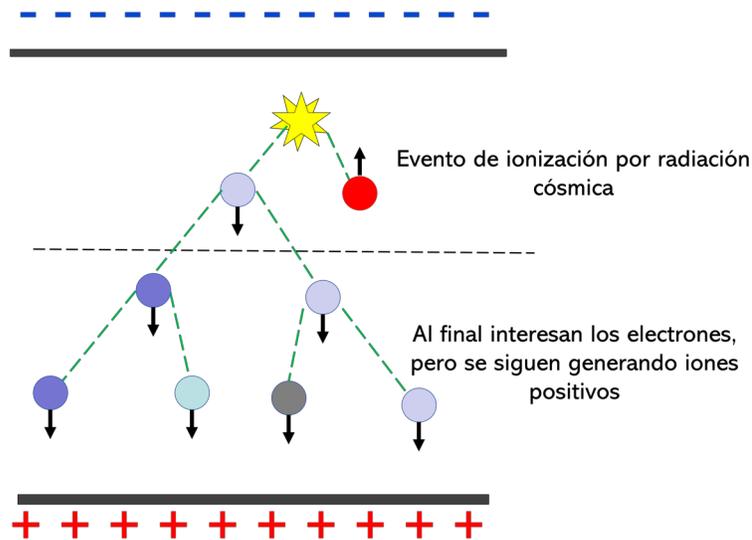


Figura 2.1: Diagrama ilustrativo de cascada de ionización en un medio gaseoso con un campo eléctrico suficientemente grande. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

En la primera parte de la figura [2.1] se muestra un evento de ionización que causa un rayo cósmico en un medio gaseoso con un campo eléctrico aplicado, luego de la horizontal segmentada de color negro, se dejan de lado los iones positivos (en rojo) y se sigue la línea de eventos de los negativos (electrones, en tonos azules y grises) ya que son los que nos interesa coleccionar en la fibra metálica para obtener una señal eléctrica (se pueden coleccionar los iones positivos también aplicando un voltaje negativo a la fibra metálica).

Cabe resaltar que el circuito está conectado a alto voltaje, los instrumentos normales como las computadoras no operan con miles de voltios, es por ello que deberemos separar el alto voltaje de bajo voltaje y realizar lecturas de datos en bajo voltaje, para ello se requiere un circuito eléctrico que se presenta en la sección de "Circuito eléctrico".

Una observación importante es que la amplitud de la señal coleccionada es proporcional a número de los electrones incidentes, y el número de electrones incidentes es proporcional a la distancia de la fibra al rayo cósmico, la amplitud también podría

tener relación con la energía de la partícula ionizante pero más estrictamente con la probabilidad de ionizar el gas, es decir, mientras más recorrido de la partícula dentro del tubo y más alto el voltaje aplicado, la cascada será mayor.

2.2.2. Fotonización

Radiación por centelleo.

El centelleo es el proceso en el que una partícula de radiación deja energía en algún material causando cierta excitación -en nivel rotacional, vibracional, etc.-, luego el material se desexcita en tiempos del orden de ns, o menores, y emitiendo un fotón, u ondas electromagnéticas. La frecuencia de las ondas electromagnéticas emitidas está dentro o cerca del espectro visible y por ello observamos centelleo. De modo que se utilizan foto-sensores para captar la luz resultante del centelleo y así saber que una partícula atravesó el volumen del material sensible.

El ojo, por ejemplo, es un tipo de foto-sensor. El fenómeno detrás de los materiales centelladores se llama fluorescencia, le denominamos centelleo debido a que la luz se emite con retrasos del orden de 10 ns.[7]

La fluorescencia es el proceso en el cual al incidir alguna partícula con suficiente energía en un átomo, éste se excita y los electrones cambian entre niveles de energía, cuando el átomo regresa a su estado base se genera una emisión fotónica por lo que obtenemos fluorescencia.

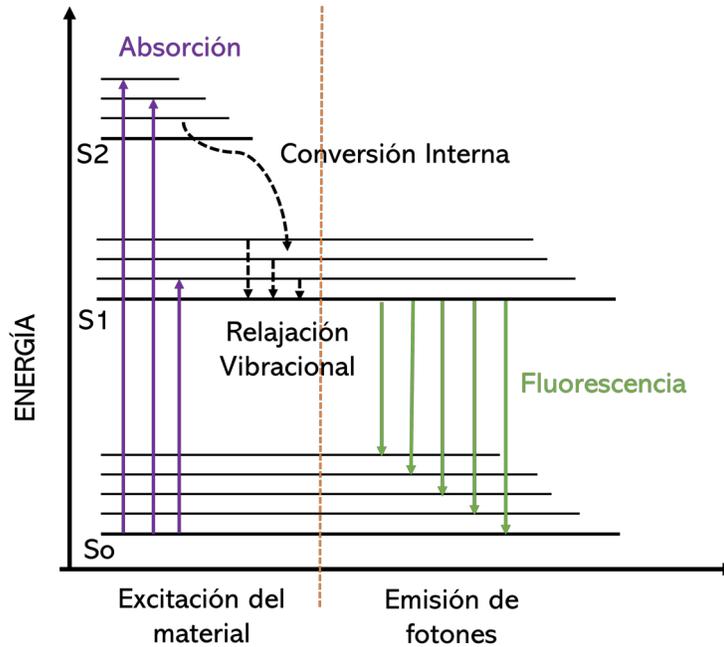


Figura 2.2: Diagrama de Jablonski en el que se muestra el momento de la emisión de luz en los estados de excitación de un átomo. Se excluye la sección de cruces de intersistema y fosforescencia. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

En la figura [2.2] observamos como un átomo cambia su estado entre varios niveles de energía bien determinados, en el proceso de desexcitación hay altas probabilidades de que se emita luz.

De los experimentos, podemos tomar como primera aproximación, la emisión de fotones en función del tiempo como un decaimiento exponencial

$$N_{\gamma}(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (2.3)$$

donde N_0 es el número total de fotones emitidos y τ_d debería ser una constante de decaimiento característica del material.[7]

La expresión [2.3] es la forma mas simple de describir el proceso de centelleo, e implica que básicamente el centelleo se produce a pulsos, al incidir radiación en el material, al instante observaremos grandes emisiones de luz que decaerán rápidamente con el tiempo. Los procesos de centelleo suelen tener componentes de decaimiento rápidas y componentes lentas por lo que se suelen describir de manera mas precisa con expre-

siones que contienen un doble exponencial decadente, sin embargo la conclusión es la misma, la luz se emite a pulsos conforme incide radiación. [7]

Detección de fotones

Existen varias maneras para la detección de fotones, sin embargo para el efecto de este proyecto vamos a hablar un poco sobre los foto-diodos.

Sabemos que un foto-diodo convierte las señales de luz en señales eléctricas. El proceso físico se describe a continuación.

El principal responsable del correcto funcionamiento de un foto-diodo es el efecto fotoeléctrico explicado por Einstein el siglo pasado (1905). Cuando un fotón con suficiente energía $h\nu$ incide en algún material, desprende un electrón del mismo creando cargas libres.

Supongamos que tenemos una lámina de material en la que incide un fotón con energía $h\nu$, esta energía se repartirá en la energía necesaria para separar el electrón del átomo llevándolo a la superficie del material (w_0), otra cantidad para desprenderlo del material (w) y finalmente si el electrón está en movimiento, su energía cinética (K). De modo que la energía del fotón por el principio de conservación será

$$E_\gamma = h\nu = w_0 + w + K$$

La energía cinética del electrón emitido será pues

$$K = h\nu - (w_0 + w)$$

Donde podemos suponer que si el electrón ya está cerca de la superficie la energía máxima será

$$K_{max} = h\nu - w$$

Cada material tiene energías características w distintas por lo que las frecuencias de emisión son diferentes entre materiales, información importante en el momento de construcción de foto-diodos. Nos interesa el proceso de efecto fotoeléctrico interno en

el cual al desprenderse el electrón se generará un par electrón-ion, si nosotros tenemos una diferencia de potencial eléctrico aplicada a las orillas del material podremos captar electrones y iones generando así una corriente eléctrica la cual nos indicará la incidencia de fotones en nuestro material.[8][9]

Ahora bien, si ponemos el diodo en un plástico centellador, detectaremos los fotones generados por el paso de un rayo cósmico y sabremos pues que incidió en el detector.

2.3. Veto detectores

Se le conoce como veto detectores a cualquier tipo de detector que se utiliza para discriminar señales y asegurar que los rayos cósmicos atraviesen todo el dispositivo experimental. Se colocan normalmente en los extremos de la zona de detección de modo que al obtener señal en ambos veto detectores aseguramos que la partícula atravesó toda la zona de detección.

Cualquier tipo de detector puede ser útil como veto detector, en este proyecto se utilizan detectores a base de plásticos centelladores.

2.4. Circuito eléctrico

Los detectores de radiación cósmica requieren de circuitos eléctricos para la obtención de señales eléctricas amplificadas que sean fácilmente tratables en los dispositivos de análisis de datos sin mencionar como se mostró en las secciones anteriores que la radiación cósmica se detecta por fotonización o por ionización y ambos procesos requieren que se apliquen diferentes voltajes para obtener campos eléctricos.

2.4.1. Ley de Ohm

Normalmente la ley de Ohm no se interpreta de manera correcta, sin embargo su correcta interpretación y escritura nos ayuda a crear dispositivos como el desarrollado en este proyecto de tesis.

Es sencillo apreciar su correcta interpretación partiendo del principio observacional

que establece que el flujo de corriente eléctrica (J) debe ser proporcional al campo eléctrico (E) que mueve dichas cargas por el material

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.4)$$

donde la constante de proporcionalidad depende de las propiedades del material, en este caso la facilidad con la que las cargas se mueven dentro de éste, a dicha cantidad la llamamos conductividad eléctrica. Sabemos que las cargas eléctricas tienen interacciones electromagnéticas, por lo que en un principio la fuerza que mueve a las cargas en un material, será la fuerza de Lorentz que se compone de interacciones eléctricas y magnéticas.

$$\vec{J} = \sigma' (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

en la expresión anterior el factor de carga se encuentra en la constante σ' . Resulta que la velocidad de las cargas, en los materiales que estamos estudiando, es lo suficiente pequeña como para eliminar el término magnético. Para simplificar la notación, vuelvo a escribir $\sigma' \rightarrow \sigma$.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

Ahora bien, pensemos en un material conductor con una longitud L y un área transversal S al que se le aplica un campo eléctrico \vec{E} .

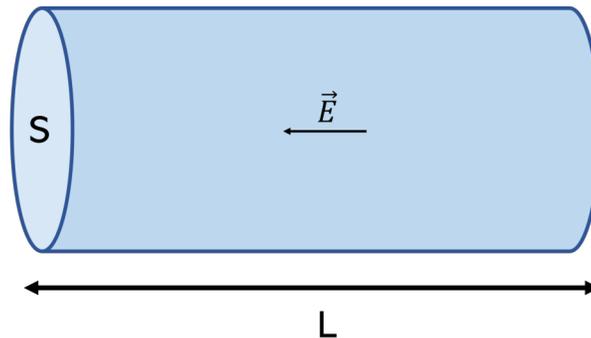


Figura 2.3: Ilustración de un material conductor con un campo eléctrico aplicado. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Si tomamos la ecuación [2.5] y la integramos en el área transversal del material

$$\int \vec{J} \cdot d\vec{s} = \sigma \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

El flujo de corriente que pasa por cierta área es simplemente la corriente eléctrica.

$$I = \sigma \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Suponiendo que el campo no depende de la geometría del material

$$I = \sigma ES$$

Podemos reescribir la expresión como

$$I = \sigma SE \frac{L}{L}$$

Donde

$$EL = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = V$$

Así que obtenemos pues

$$I = \sigma \frac{S}{L} V$$

Vemos que el término $\sigma \frac{S}{L}$ es dependiente solo de las propiedades del material, entonces, podemos definir la resistividad eléctrica como la capacidad de oposición de un material a las corrientes eléctricas por lo que será el inverso de la conductividad $\rho \equiv \frac{1}{\sigma}$. Pensando en un conductor con cierta área transversal y una longitud dada, definimos la resistencia de dicho material como $R \equiv \rho \frac{L}{S}$.

Por lo que llegamos a la expresión de la ley de Ohm.[10]

$$I = \frac{V}{R} \tag{2.6}$$

Lo que implica la expresión anterior es sorprendente. Dado un voltaje y una resistencia en un material, se obtendrá una corriente eléctrica. Ésa es la interpretación

correcta, ya que podemos tener un voltaje sin corrientes eléctricas y del mismo modo la resistencia de un material existirá ya que es una propiedad del mismo y no una consecuencia del voltaje y la corriente eléctrica.

Entender lo anterior es importante debido a que podremos aplicar altos voltajes a conductores finos para arrastrar electrones hacia éstos, la ausencia de corrientes eléctricas grandes evitará que los componentes eléctricos se dañen.

2.4.2. Circuito RC

Un circuito resistor-capacitor es un circuito básico en el cual un capacitor se carga y descarga con una resistencia.

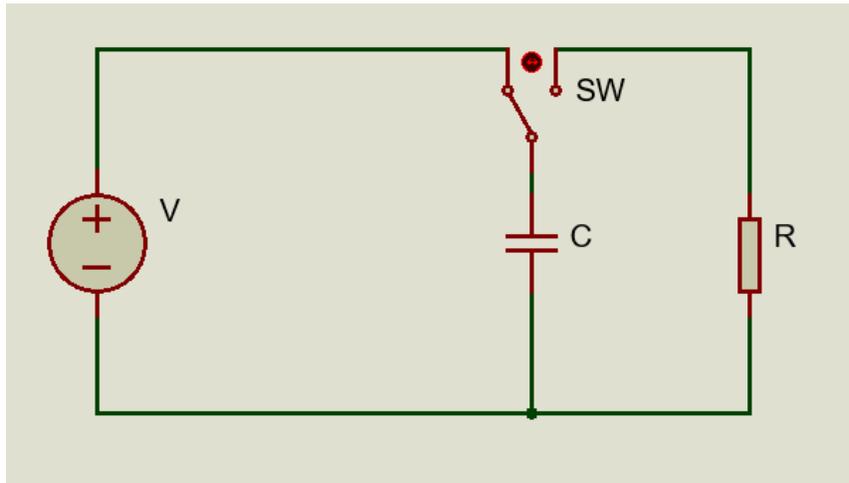


Figura 2.4: Diagrama ilustrativo de circuito RC. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Podemos apreciar que existen dos casos de la figura anterior, el caso de carga del capacitor y el caso de descarga con la resistencia.

Supongamos el primer caso donde el circuito se encuentra conectado a la fuente de voltaje. El capacitor almacenará carga eléctrica, si desconectamos la fuente queda solo conectada la resistencia, en un instante t_0 el capacitor tendrá una diferencia de potencial V_0 . Si observamos la figura [2.4], es sencillo notar que la corriente en la parte del capacitor es la misma que en la parte de la resistencia.

$$I_c = I_R$$

$$C \frac{dV}{dt} = -\frac{V}{R}$$

Simplemente queda reacomodar la expresión y dividir por el factor C .

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{RC} = 0 \quad (2.7)$$

Tenemos una ecuación diferencial de primer orden sencilla de resolver

$$\int \frac{dV}{V} = -\frac{1}{RC} \int dt$$

$$\ln V(t) - \ln V(0) = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln \frac{V(t)}{V_0} = -\frac{t}{RC}$$

Finalmente el voltaje en un circuito RC se puede escribir como

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.8)$$

Observamos que la función de la tensión en el momento que se desconecta de la fuente, tiene un máximo en V_0 y decae con el tiempo exponencialmente, podemos definir $\tau = RC$ y observar que si $t = \tau$ entonces $V \approx 0.37V_0$. Por lo que se llega a la conclusión de que τ es el tiempo en el que el voltaje en el capacitor decae aproximadamente al 37% del voltaje inicial.[11]

Supongamos pues que tenemos un circuito RC conectado a una fuente de voltaje pero sin corriente eléctrica alguna. Si nosotros hacemos incidir en el circuito cargas eléctricas, se producirá una corriente eléctrica debido al paso de la energía causando que el capacitor se cargue. Una vez cargado el capacitor, al no tener corriente eléctrica, se descargará con la resistencia del circuito y obtendremos la señal con la forma característica de un circuito RC.

Conclusión.

Los principios físicos que enumeramos en esta sección son los que describen el funcio-

namiento del dispositivo desarrollado a lo largo del proyecto. Una vez que pensamos con base en estos principios podemos lograr desarrollos tan innovadores u originales que estudian fenómenos de frontera utilizando conceptos que solemos subestimar en el campo de la física.

Capítulo 3

Sistema de detección de rayos cósmicos

3.1. Planeación

El objetivo planteado para el proyecto es lograr el desarrollo de un nuevo tipo de tecnología que nos permita explorar el cosmos desde el punto de vista de la radiación cósmica. Utilizando el conocimiento previamente expuesto en el capítulo 1, decidimos crear un sistema que además de detectar la radiación cósmica, nos permita obtener datos para hacer un trazado de la trayectoria de los rayos como una distribución angular.

Pensamos en utilizar varios detectores de ionización del tipo Geiger-Müller cuyo medio gaseoso será una mezcla de gases que favorezcan la detección, en este caso argón-metano, ya que el argón servirá para ser ionizado y el metano es un buen medio para absorber fotones y evitar ruido en las señales obtenidas. Podemos colocar los detectores de ionización de manera estratégica para obtener así la distribución angular deseada.

También utilizaremos detectores de fotonización en forma de veto detectores con la finalidad de descartar señales de las cuales no tenemos suficiente información.

Como primera instancia debemos centrarnos únicamente en un tubo Geiger con una fibra coaxial y relleno de la mezcla argón-metano.

En la fibra pondremos un alto voltaje, de máximo unos 3000 V, de modo que se formará un campo eléctrico radial dirigido hacia el exterior de la fibra, el tubo por su parte debe estar conectado a tierra. Al incidir una partícula de radiación, se producen eventos de ionización en el gas, produciendo partículas cargadas que, si el campo es lo suficiente fuerte, tendrán la suficiente energía para ionizar nuevamente las moléculas del gas, formando así una cascada de ionización como la mostrada en la figura [2.1].

Una vez que son generados los iones, aquéllos con carga eléctrica negativa se moverán hacia la fibra; y aquéllos con carga eléctrica positiva, hacia las paredes del tubo, lo anterior es debido al campo eléctrico (se puede cambiar la polaridad de los electrodos).

En este punto, diseñaremos un circuito eléctrico que permita poner las fibras a alto voltaje sin una corriente eléctrica circulante, para ello utilizamos la Ley de Ohm. Una vez realizado lo anterior, en otro sector del circuito montaremos un capacitor de alto voltaje, éste que separará la parte de alto voltaje y la parte de bajo voltaje en donde realizaremos la lectura de datos. Una vez colectada la carga en la fibra se generará una corriente eléctrica que cargará el capacitor que se encuentra formando un circuito RC con una resistencia adecuada así que, una vez cargado, enviará una señal que podremos leer en una computadora y así obtener una amplitud que va relacionada con la energía de la partícula detectada y la trayectoria que siguió a través del tubo, cosa que en el futuro nos permitirá diferenciar los tipos de partículas que detectamos y obtener sus trayectorias.

Lo anterior funciona para un solo tubo, si apilamos varios de modo que de cada uno obtengamos una lectura, entonces tendremos por comparación de señales un esbozo de la trayectoria que llevaba la partícula incidente.

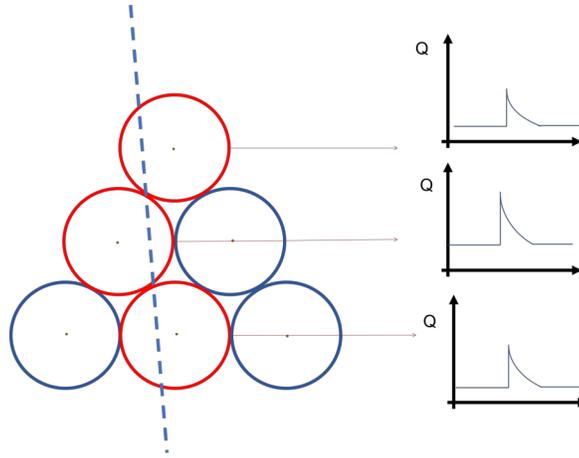


Figura 3.1: Diagrama ilustrativo de la primera aproximación del trazado de trayectorias de los rayos cósmicos. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

La mezcla de gases es importante debido a que provee la facilidad o dificultad de ionización según las partículas objetivo, en este caso el metano absorbe los fotones producidos por recombinación y nos ayuda a evitar el ruido producido por ionizaciones secundarias.

3.2. Diseño

El diseño del dispositivo ha sido creado en el software especializado SketchUp [12]. Apilamos seis tubos Geiger-Müller en forma piramidal.

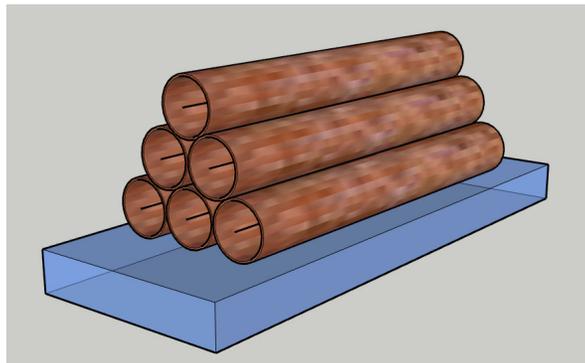


Figura 3.2: Ilustración del arreglo piramidal de tubos. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Incrustaremos los tubos en unos cabezales que tienen en su interior micro canales

para distribuir la mezcla de gases por todo el arreglo de tubos.

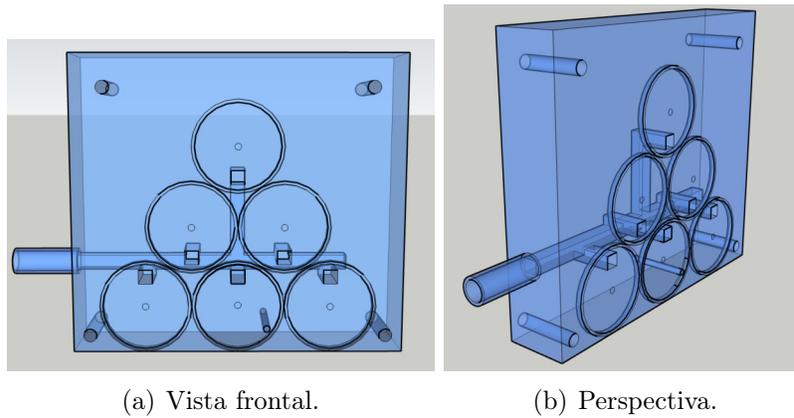
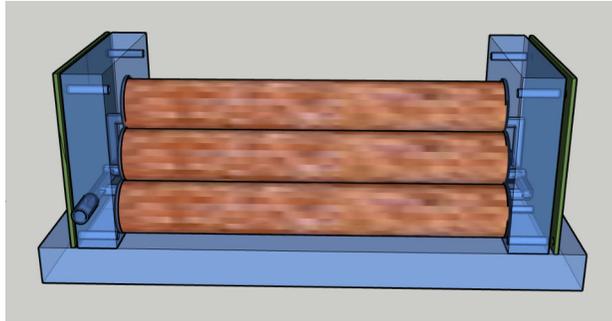


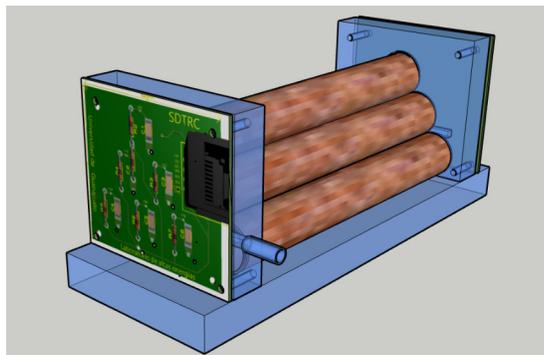
Figura 3.3: Diseño de los cabezales en donde se situarán lo tubos. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Los cabezales van montados en una base. Éstos llevan perforaciones para que las fibras de cada tubo atraviesen de lado a lado del dispositivo.

Una vez situados los tubos en los cabezales, montaremos el circuito eléctrico en los extremos del dispositivo sobre unas tarjetas electrónicas.



(a) Vista lateral.



(b) Perspectiva.

Figura 3.4: Diseño del dispositivo con el circuito eléctrico montado. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Finalmente agregamos las bases en donde montaremos los veto detectores.

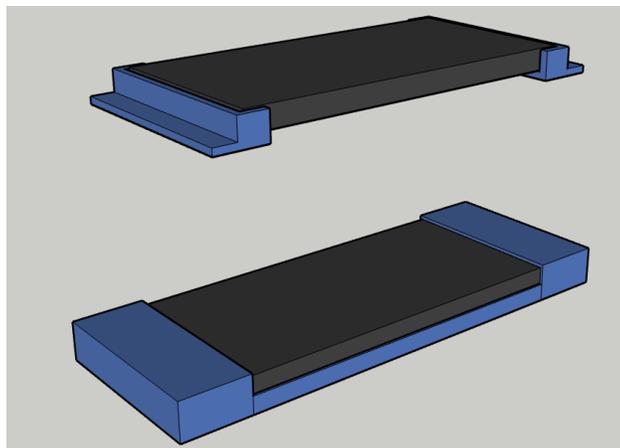
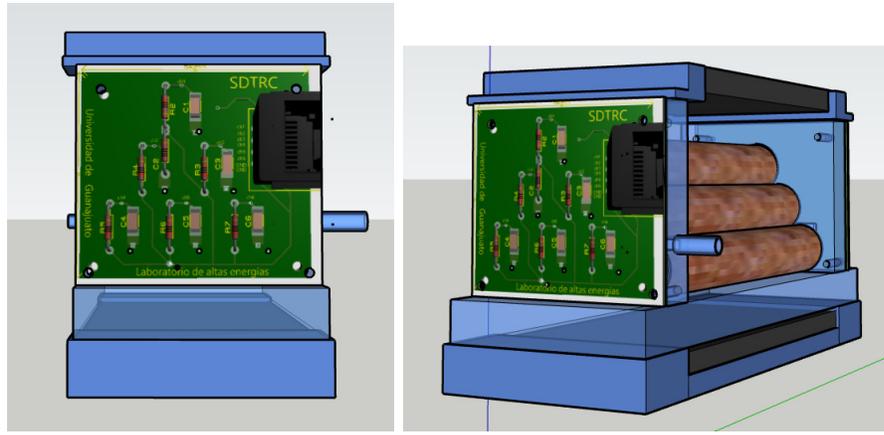


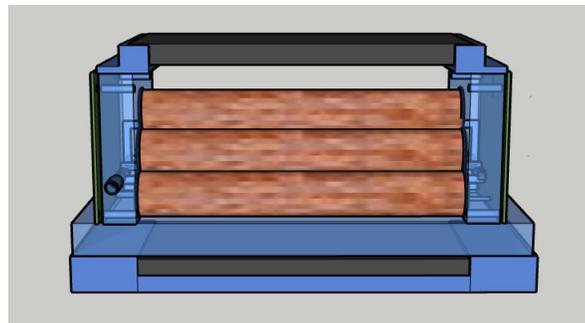
Figura 3.5: Diseño de bases para situar los veto detectores. En azul se encuentran las bases y en negro el veto detector. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

El dispositivo completamente terminado deberá verse como sigue.



(a) Vista frontal.

(b) Perspectiva.



(c) Lateral.

Figura 3.6: Diseño del Sistema de Detección y Trazado de Radiación Cósmica. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

3.2.1. Diseño de circuito eléctrico

El circuito eléctrico base, constará de una parte de alimentación de alto voltaje, con una resistencia del orden de $2\text{ k}\Omega$ para evitar que en la fibra tengamos una corriente eléctrica que pueda dañarla. En el otro extremo del circuito existirá un arreglo RC para que cuando un electrón incida en la fibra el capacitor muestre una descarga. El capacitor debe tolerar hasta 3000 V . El diseño del circuito para un solo tubo es el siguiente

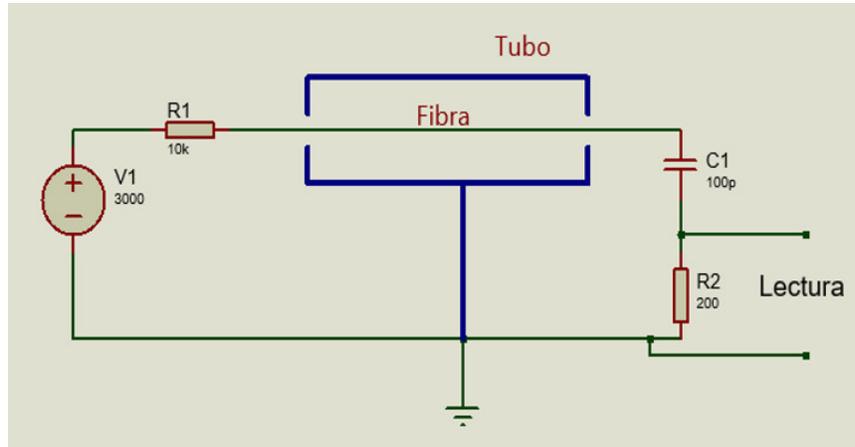


Figura 3.7: Circuito eléctrico propuesto para un solo tubo detector. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Lo anterior lo aplicamos a los 6 tubos detectores, por lo que el circuito deberá verse algo así.

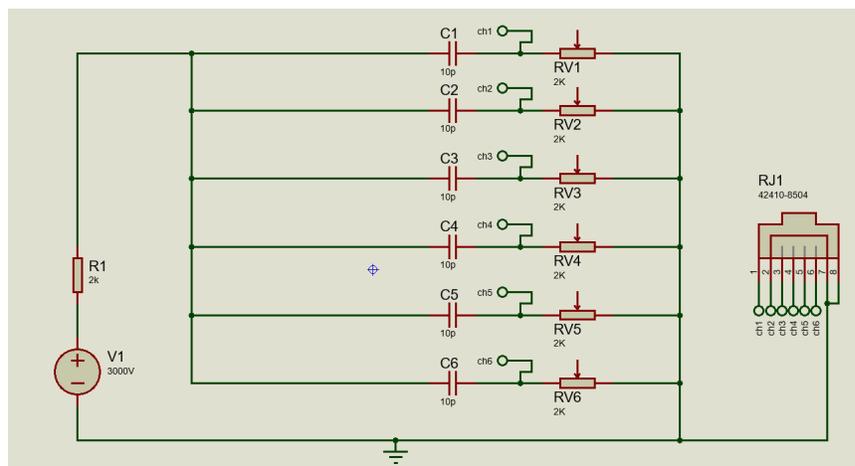


Figura 3.8: Circuito eléctrico a montar en las tarjetas electrónicas. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Todo lo acomodamos en dos tarjetas electrónicas, una de alimentación y una de lectura de datos, todo montado de manera superficial para poder montar las tarjetas en los cabezales.

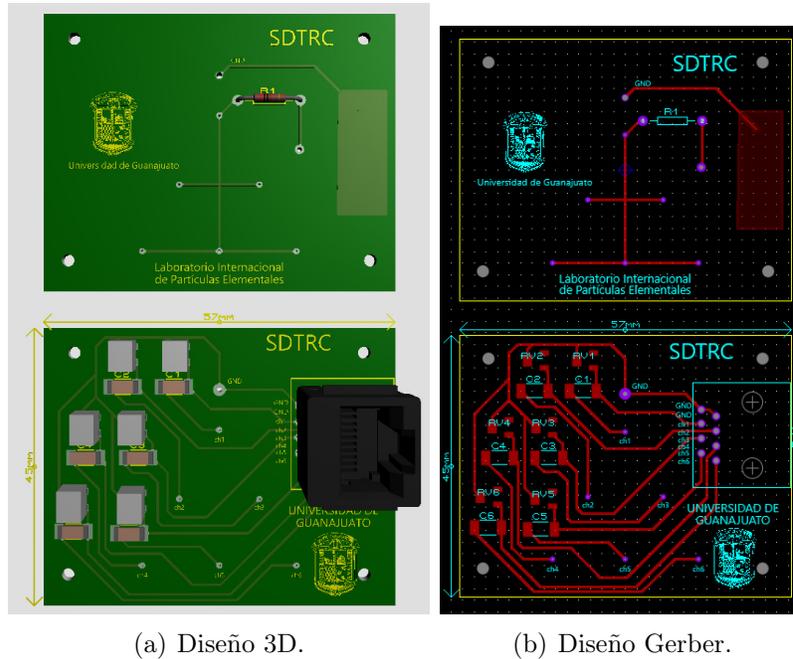


Figura 3.9: Tarjetas electrónicas diseñadas. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Utilizamos resistencias variables para el circuito RC con la finalidad de poder variar la constante τ y acoplar impedancias con el dispositivo de lectura de datos. Los capacitores son cerámicos de 3000 V y capacitancia de 10 pF. Utilizamos un conector RJ45 para la lectura de datos.

3.3. Construcción

Comenzamos la construcción cortando los tubos de la longitud requerida, conseguimos 2 tubos de latón de $\frac{1}{2}$ in de diámetro y 31cm de longitud. Cortamos 3 piezas de 10.2 cm de longitud de cada tubo. El sobrante está pensado para ser incrustado en los cabezales.



Figura 3.10: Imagen de dos tubos ya cortados y limpiados exhaustivamente. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Una vez realizados los cortes y rectificados los tubos a las medidas correspondientes con el diseño, los pulimos y limpiamos de manera exhaustiva para eliminar cualquier imperfección o material aislante, con la finalidad de asegurar el contacto eléctrico en el arreglo piramidal.

Ahora procedimos a la impresión de la base y los cabezales, la impresora del laboratorio es una Creality CP-01.

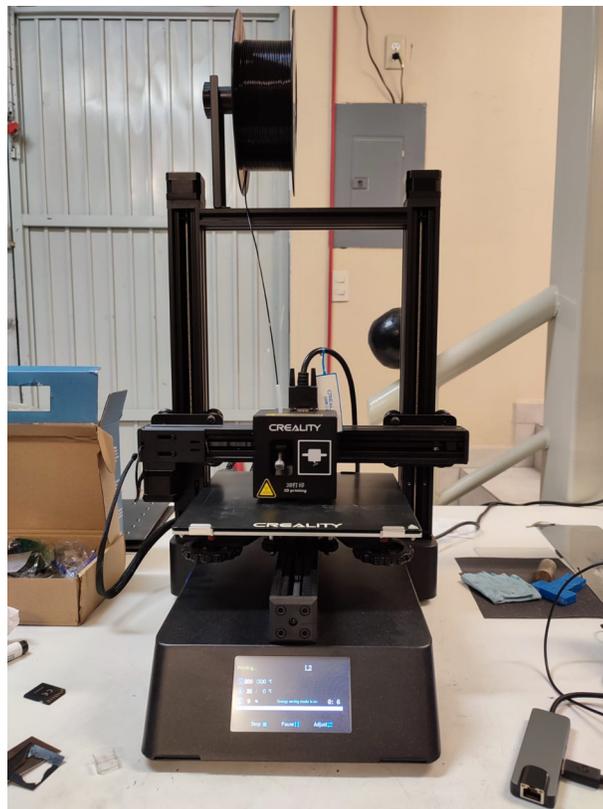


Figura 3.11: Fotografía de la impresora 3D utilizada en la construcción del dispositivo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Una vez impresa la base con los cabezales obtuvimos lo siguiente

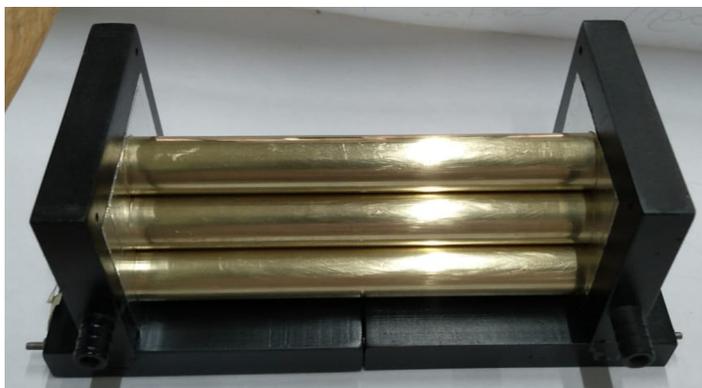


Figura 3.12: Se muestran los tubos montados en la base con los cabezales impresos en 3D. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

En este punto, lo planeado es que todos los tubos estuviesen en contacto eléctrico entre sí, sin embargo al hacer la revisión me di cuenta de que no era así. Agregué entonces cinta de aluminio en cada cabezal para que hiciera la función de sello y a su vez de conductor para interconectar todos los tubos.

Una vez posicionados los tubos, procedemos a la inserción de las fibras de oro y tungsteno, utilizamos las fibras de "California Fine Wire Company", de diámetro 0.0025 cm, como se muestra a continuación:



Figura 3.13: Paquete del carrete de fibras de oro y tungsteno utilizadas en la construcción del dispositivo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Montamos el dispositivo sobre una hoja color blanco para poder pegar las puntas de las fibras al papel, además de proporcionar facilidad para ver las mismas y evitar

que se enreden o se doblen debido a que deben ser manejadas con suma cautela.

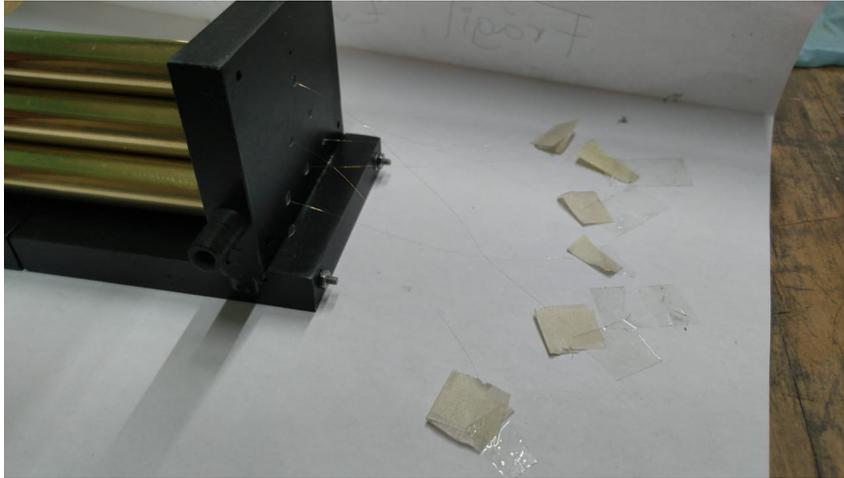


Figura 3.14: Se muestran las fibras introducidas en los tubos del dispositivo, con un pedazo de cinta masking en la punta para mantenerlas fijadas al papel. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

Una vez colocadas las fibras, sellamos los orificios de un lateral con resina epóxica, para evitar fugas de gas en el futuro. Para sellar ambos lados debemos tensar la fibra por lo que utilizamos pesas para dicha tarea. Primero, con la finalidad de sostener con fuerza la fibra, colocamos en su sitio una tarjeta electrónica para soldar las fibras del lado que ya está previamente sellado.

Mandamos a imprimir las tarjetas electrónicas con el diseño mostrado en la sección anterior. Sin embargo, la empresa que las fabricó, hizo la sugerencia de agregar mejor 2 conectores RJ45 para colocar por pares (señal y tierra) cada canal.

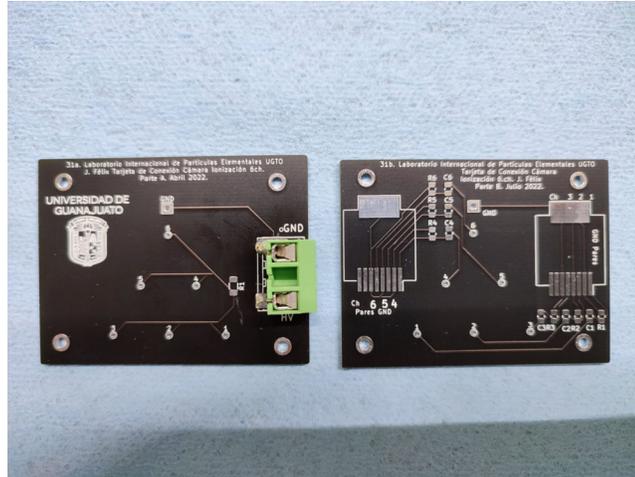


Figura 3.15: Tarjetas electrónicas sin componentes electrónicos montados. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

Poblamos las tarjetas en el laboratorio con las siguientes especificaciones:

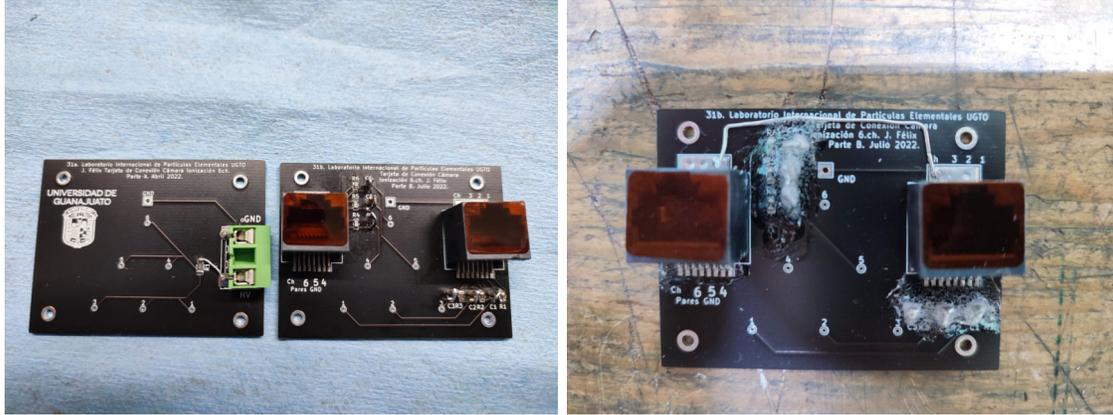
Tarjeta de alimentación de alto voltaje:

- Conector de electrodos fijables por presión.
- Resistencia de 2000Ω

Tarjeta de lectura de datos:

- 2 puertos RJ4.
- 6 resistencias de 330Ω .
- 6 capacitores de aproximadamente 10pF , con variaciones del 30% y de hasta 3000V .

Una vez soldados los componentes, las tarjetas electrónicas quedaron como se muestra a continuación



(a) Tarjetas pobladas con componentes. (b) Tarjeta de lectura sellada con aislante.

Figura 3.16: En la primera imagen, se muestran las tarjetas electrónicas con todos los componentes montados en la superficie. En la segunda imagen, se muestra la tarjeta de lectura con un recubrimiento acrílico para evitar descargas no deseadas. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Debido a que en el laboratorio no contamos con los capacitores de alto voltaje del tamaño correspondiente, soldamos los disponibles en vertical a la tarjeta y con un conductor pequeño cerramos el circuito. Para evitar descargas debido al alto voltaje y las cortas distancias entre terminales, colocamos un material acrílico cubriendo los componentes en la tarjeta de lectura.

Una vez listas las tarjetas electrónicas colocamos una de ellas en un lateral del dispositivo para soldar las fibras.



Figura 3.17: Se muestra el dispositivo con una de las tarjetas electrónicas siendo montada, para así proceder al tensado de fibras. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Ya hecho lo anterior, colocamos el dispositivo de manera vertical para pegar las

pesas de 20 g a las fibras y sellar los orificios del cabezal con resina epóxica.

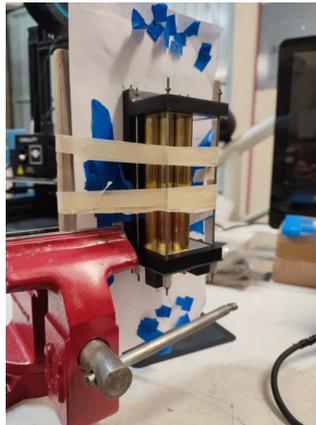
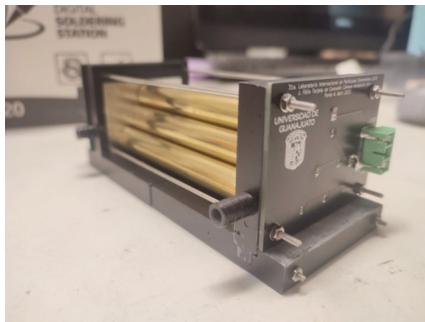
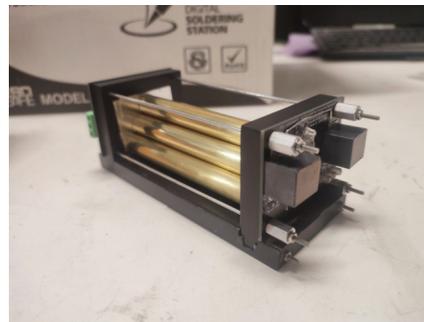


Figura 3.18: Se montó el dispositivo de manera vertical con ayuda de una prensa, para realizar el tensado de fibras a 20 g. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

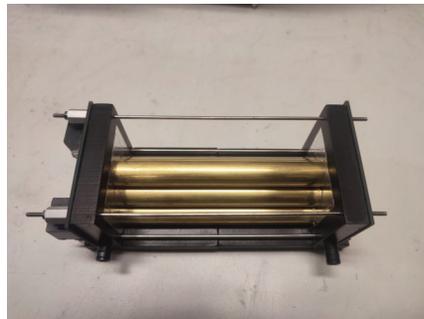
Luego del secado de la resina, procedimos a colocar la tarjeta electrónica restante y soldar las fibras. El dispositivo de detección quedó listo como se muestra a continuación



(a) Perspectiva trasera.



(b) Perspectiva frontal.



(c) Vista superior.

Figura 3.19: Imágenes de las diferentes vistas del dispositivo final, listo para iniciar pruebas de detección. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Finalmente revisamos la conexión eléctrica de las fibras con las tarjetas e interconectamos las tierras con los tubos de latón.

Es importante resaltar en lo cuidadoso que se debe ser en el proceso anterior debido a que la ruptura de alguna de las fibras implica iniciar el proceso de construcción casi desde cero.

Para en el futuro colocar los veto detectores a base de plástico centellador, imprimiremos los soportes mostrados en la sección de "Diseño" en la Creality CP-01. El objetivo es montar un veto detector superior para discriminar señales que no atraviesen todo el dispositivo. El veto detector inferior, se puede montar simplemente sobre la mesa debido a que es plano. Esta parte del procedimiento la dejaremos para el trabajo futuro del dispositivo.

3.4. Caracterización

Consideramos la parte frontal del dispositivo la cara en donde se encuentra la tarjeta de lectura de datos. Visto desde frente la disposición de los canales es la mostrada a continuación.

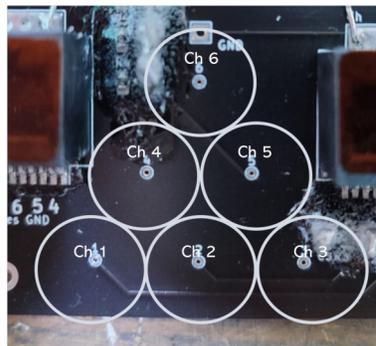


Figura 3.20: En la tarjeta electrónica se muestra la disposición de los 6 canales del dispositivo. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

De modo que para realizar la caracterización del dispositivo comenzamos desde el canal 6 y de manera descendente aplicando voltajes positivos y negativos en aumentos de 100V dentro del rango de 560V a 1800 V. Cada cambio dura un tiempo de 10 a 15 minutos. El montaje experimental realizado es el siguiente:

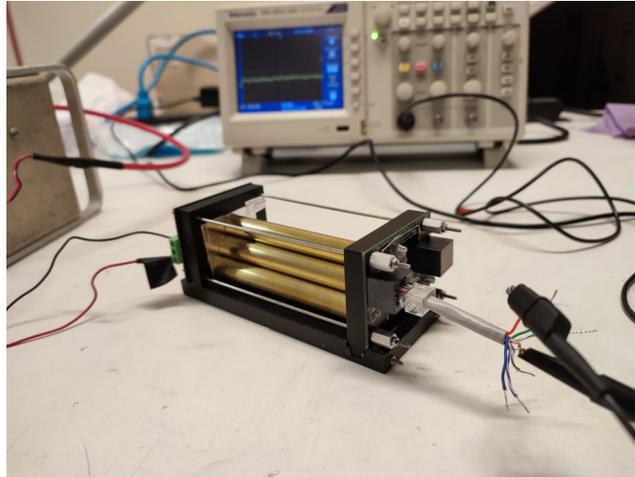


Figura 3.21: Montaje realizado para caracterizar el dispositivo. Únicamente conectamos un canal pues la caracterización debe ser para cada tubo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

La fuente de alto voltaje utilizada es una modelo 1570-M4 del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab).



Figura 3.22: Fuente utilizada para aplicar alto voltaje en el dispositivo experimental. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Observamos varias señales de ruido y únicamente una señal que está dentro de los parámetros esperados a un voltaje de -1060V .

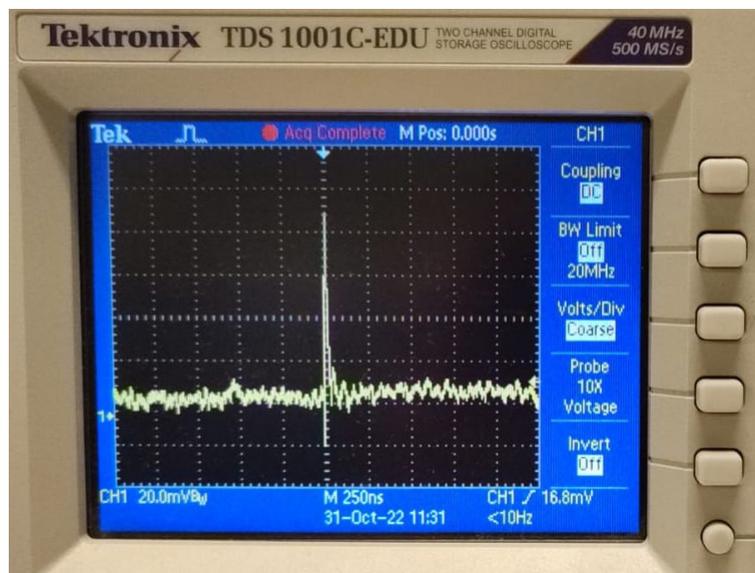


Figura 3.23: Señal observada para el canal 6 con un voltaje de operación de -1060 V. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

La señal no se repite frecuentemente lo que nos lleva a aumentar el voltaje. Hasta -1700V aún no observamos detección alguna que es algo no esperado así que realizamos una exhaustiva revisión del circuito eléctrico.

Durante las pruebas de operación en el voltaje de -1700V, hubo un corto circuito y procedimos a apagar el dispositivo. Una vez revisado el circuito observamos que las descargas de capacitor que ocurren en un canal, ocurrirán de manera simultánea en todos los canales lo que no es útil para el propósito de este proyecto. También se trozaron las fibras de los canales 1 y 3 sin un daño perjudicial a los demás canales restantes por lo que decidimos continuar con los 4 canales restantes que forman un rombo y aún será posible cumplir los objetivos del proyecto. Además, el hecho de que no observamos señales recurrentes, puede deberse a que las impedancias del dispositivo y los instrumentos no tienen un correcto acoplamiento, sin embargo, en el laboratorio no tenemos resistencias variables de montaje superficial y las tarjetas están selladas con acrílico. Es por ello que pasamos a conectar cada tubo por separado a un circuito externo de manera que sea sencillo probar y caracterizar cada tubo.

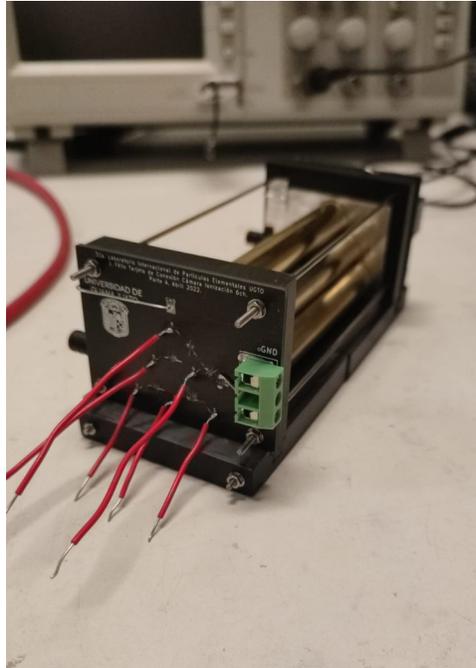


Figura 3.24: Cortamos los footprints en las tarjetas electrónicas para separar eléctricamente las fibras, después soldamos un cable individual a cada canal con la finalidad de conectar cada uno a un circuito externo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Para cada tubo entonces tenemos un nuevo circuito RC a probar:

- Circuito RC: $R=280\Omega$, $C=10\text{pF}$.
- Resistencia de alimentación de 1200Ω .

El montaje con circuito externo queda como sigue:

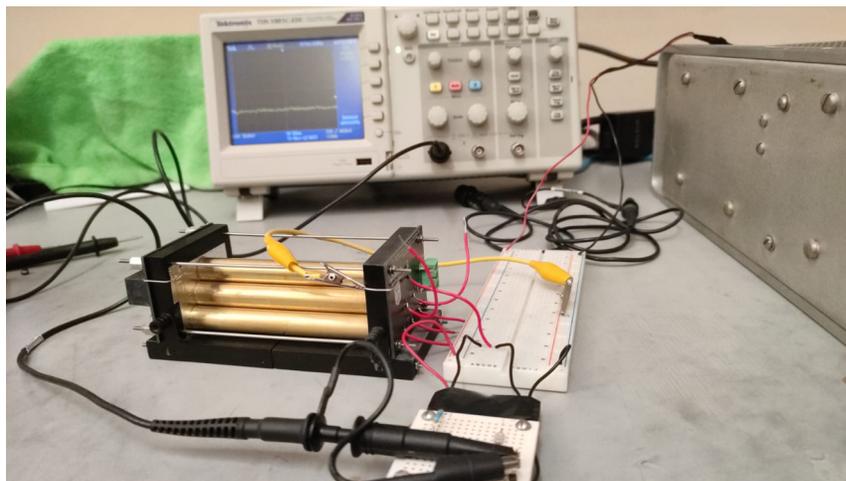


Figura 3.25: Montaje experimental con circuito externo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Para el canal 6, iniciamos operando en $-1000V$ y procedimos con aumentos de $100V$ en la diferencia de potencial. Finalmente, a partir de $-1500V$ comenzamos a observar las señales esperadas. Procedimos entonces a probar los 4 canales a partir de $-1500V$.

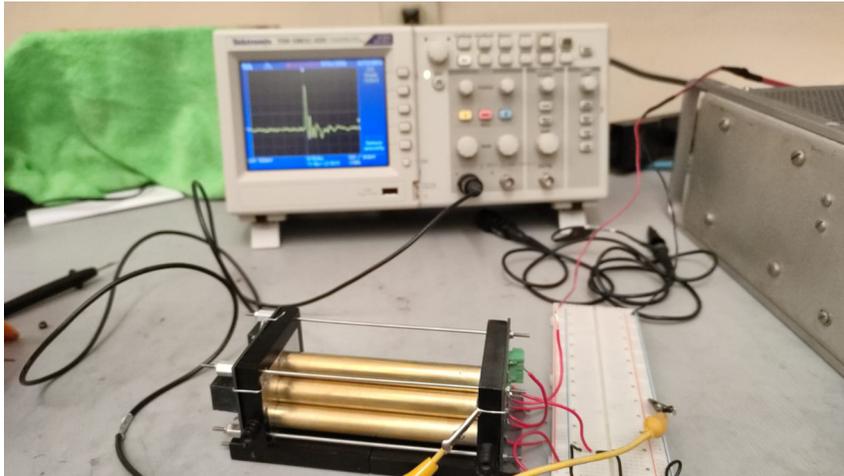


Figura 3.26: Montaje experimental con circuito externo, se encuentra en funcionamiento el canal 6 a un voltaje de $-1700V$. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Las señales observadas tienen tiempos de descarga de aproximadamente $50ns$, que es un tiempo dentro de los parámetros esperados, una vez realizadas las pruebas en cada canal, obtuvimos una galería de señales.

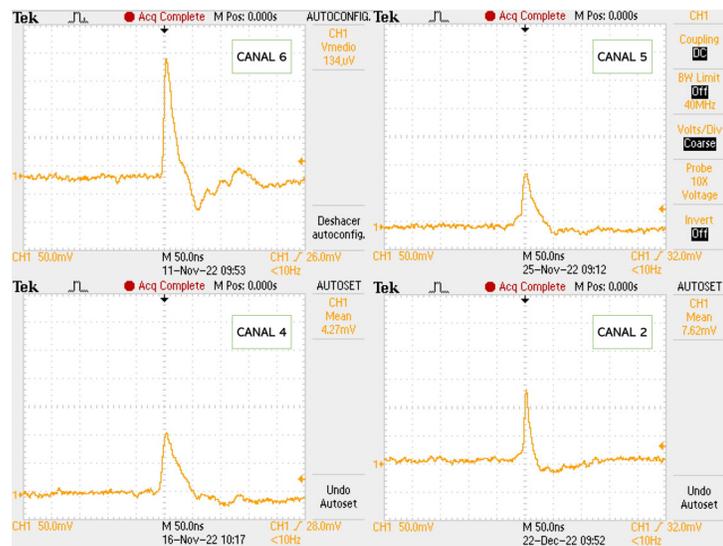


Figura 3.27: Ejemplos de señales eléctricas obtenidas en cada canal operando con un voltaje de $-1700V$. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Otro de los objetivos del cambio en el circuito eléctrico, es el de agregar una resistencia de alimentación por tubo con la finalidad de separar completamente una señal de otra. El circuito final es el siguiente

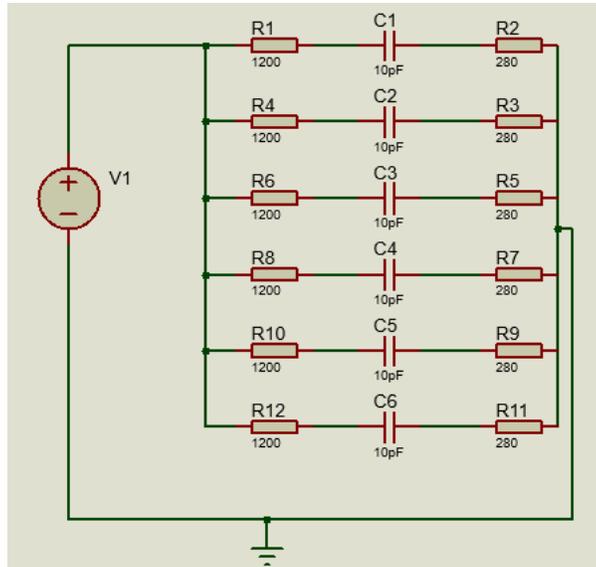


Figura 3.28: Diseño de circuito eléctrico modificado. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

El diseño del circuito eléctrico se modificó utilizando el software de simulación Proteus. Una vez se tenía el diseño, el circuito se montó en una protoboard debido a que el tiempo no era suficiente para volver a imprimir otras tarjetas electrónicas y armar el dispositivo desde cero.

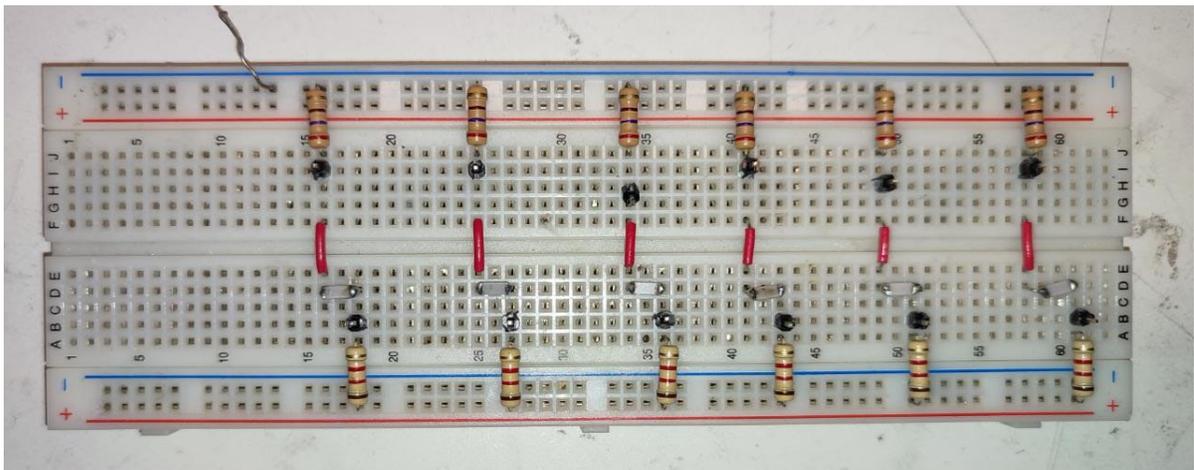
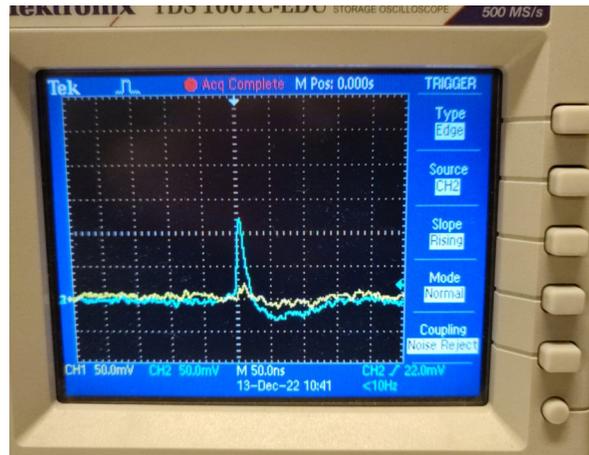
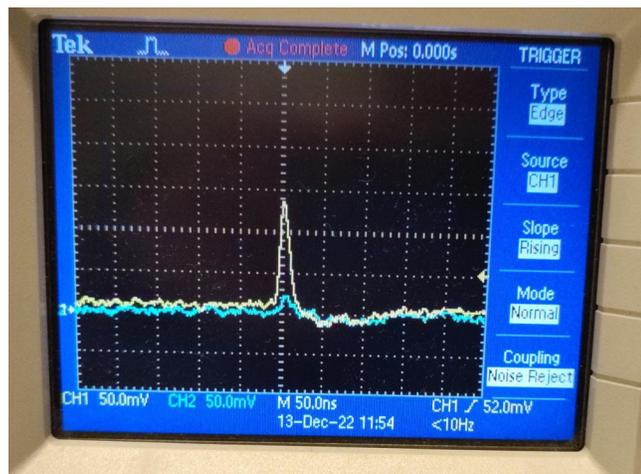


Figura 3.29: Circuito modificado montado en protoboard. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Una vez conectado el dispositivo, probamos dos canales simultáneos con una resistencia de alimentación común y observamos descargas que prácticamente son la misma señal, luego implementamos el circuito de la figura 3.29 que tiene una resistencia de alimentación por canal y el resultado fue el siguiente.



(a) Trigger en canal 2.



(b) Trigger en canal 1.

Figura 3.30: Prueba de sondeo en dos canales simultáneos cambiando el trigger de canal. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Tal como se observa en la figura 3.30 podemos notar que el ruido introducido en otro canal respecto a la descarga del canal sondeado es nulo. Con la implementación del circuito podemos descartar dicho ruido utilizando el trigger del osciloscopio, lo que nos permite obtener señales separadas.

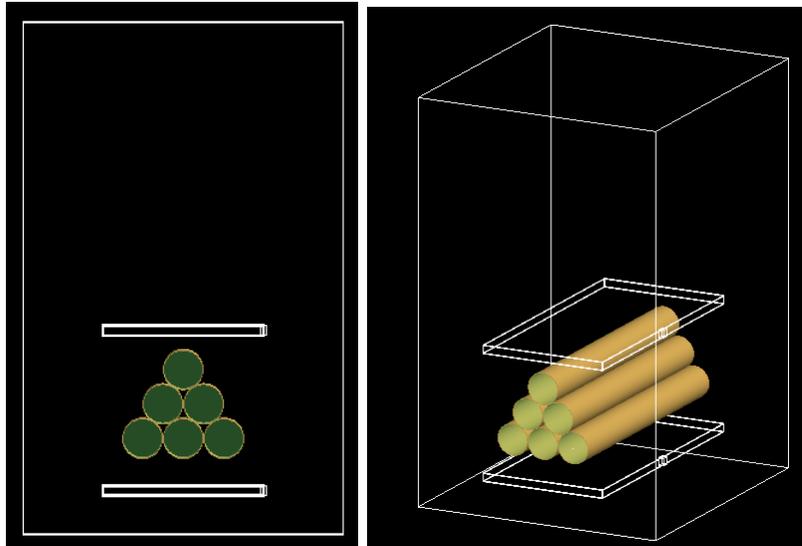
3.5. Simulación de funcionamiento

Trabajamos en la simulación del dispositivo con los dos tipos de detección mencionados anteriormente (ionización y fotonización). El software de simulación utilizado es GEANT4 que es software libre desarrollado por el CERN con base en el lenguaje C++.

Para desarrollar una simulación utilizando GEANT4 lo mejor es crear diversos scripts para colocar cada clase y llamar a las librerías correspondientes. La simulación que desarrollamos se divide en los siguientes scripts:

- El script principal en donde damos instrucciones para correr la simulación (sim.cc).
- Los scripts de la construcción. En donde definimos el mundo y sus propiedades, así como las geometrías del dispositivo y los campos electromagnéticos (construction).
- Los de las características físicas como la parte de óptica y la electromagnética (physics).
- Los scripts de las propiedades de los volúmenes detectores para hacer el seguimiento de las partículas (detector).
- La parte de generación de partículas, definición de momentos y direcciones (action).
- Las bibliotecas agregadas para incluir procesos como las cascadas de ionización, físicas de partículas en específico, entre otros (A01muonphysics).

Lo primero en la simulación es definir el mundo con las geometrías necesarias de los materiales necesarios, tomamos todos los materiales tal cual especificamos previamente en la sección de construcción del dispositivo. La geometría efectiva (en donde ocurren los procesos físicos que nos interesan) resulta ser los 6 tubos de latón con sus fibras concéntricas y los dos plásticos centelladores superior e inferior. Una vez definido lo anterior, el mundo queda como se muestra:

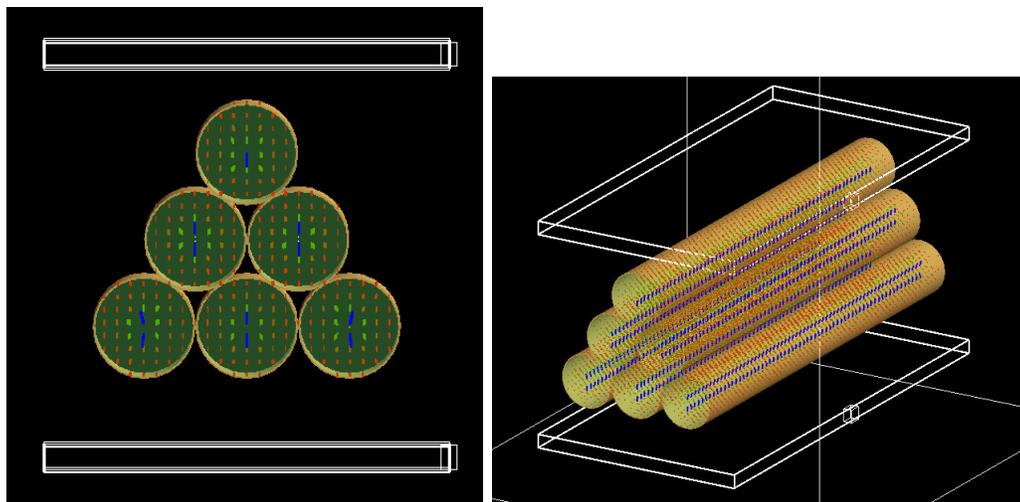


(a) Vista frontal de simulación.

(b) Perspectiva de simulación.

Figura 3.31: Se muestran las imágenes de la geometría efectiva del dispositivo. Los dos plásticos centelladores en los extremos superior e inferior con un pequeño fotodiodo cada uno (pequeño prisma rectangular). En la parte central, los tubos detectores tipo Geiger-Müller rellenos con una mezcla de argón (95%) y metano (5%). *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Una vez realizado lo anterior, agregamos las características del medio, en este caso los campos radiales en cada tubo debidos al voltaje en las fibras.



(a) Vista frontal de campos.

(b) Perspectiva de campos.

Figura 3.32: Se muestran las líneas de campo eléctrico para la geometría del dispositivo, el campo es más intenso en el color azul y de menor intensidad en el color rojo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Definimos el campo con muchos campos lineales de manera discreta que deben irse rotando un pequeño ángulo cada vez. Para que el campo represente correctamente un campo real debe decaer como $1/r$ por lo que también definimos varias capas con el aumento de r , de forma que los campos circulares van decayendo en magnitud. Ahora, agregamos las propiedades ópticas de los plásticos centelladores, que tomamos de la página del fabricante, es decir, el centelleo en el siguiente espectro de emisión.

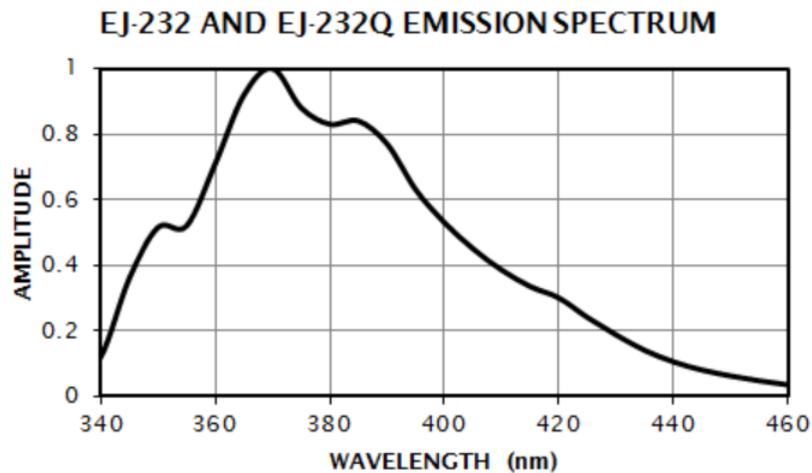


Figura 3.33: Gráfico de emisión del plástico centellador previsto para el dispositivo. [13]

También especificamos en el software que los vetos están cubiertos de una capa reflectante de aluminio con la finalidad de obtener un fenómeno de reflexión total interna. La manera de definir las propiedades de emisión es simplemente tomando por inspección un conjunto de puntos de la curva. Una vez agregadas las propiedades ópticas obtuvimos la siguiente simulación.

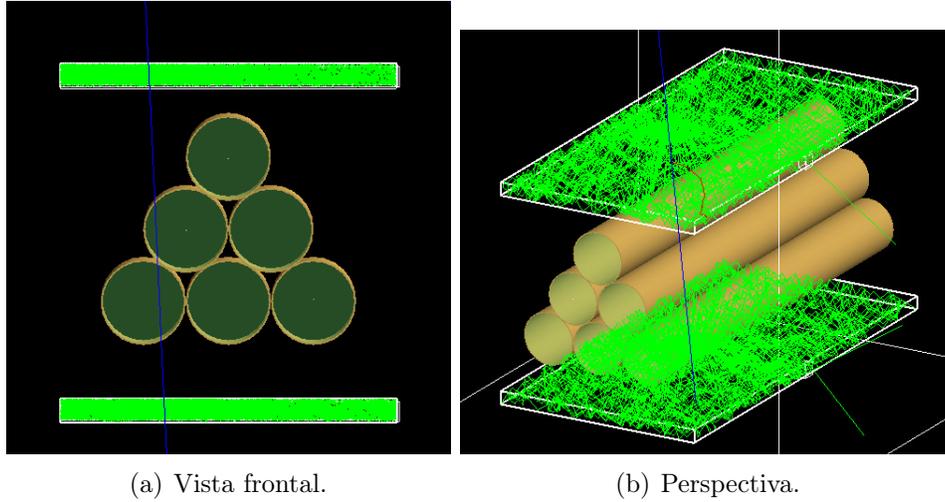


Figura 3.34: Simulación con todas las propiedades ópticas de los veto-detectores y un muón atravesando ambos volúmenes efectivos. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Para poder realizar el rastreo de los fotones (verde) y electrones generados por los muones, debemos definir volúmenes de detección. Para los fotones serán unos fotodiodos de 3 mm^3 situados en las orillas de cada veto detector. Para los electrones, se convierte en volumen detector cada fibra de los tubos ya que ahí incide la cascada de iones. Luego se guarda la información una vez corremos la simulación para poder representarla gráficamente y analizar si es como se esperaba.

Tenemos ahora la siguiente gráfica de incidencia de los fotones dentro de los fotodiodos en los veto detectores

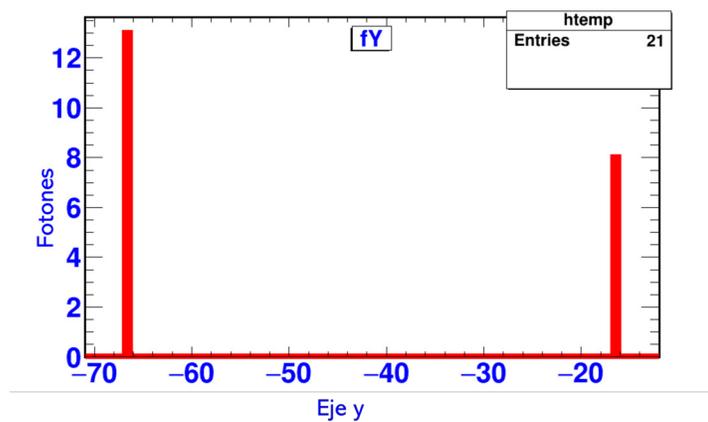


Figura 3.35: Incidencia de fotones dentro de los fotodiodos de los veto-detectores. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Como se observa en el gráfico anterior, a pesar de observarse en la simulación un número tan alto de fotones generados en los plásticos centelladores, el número de incidencias ronda en los 10 fotones por veto detector, por lo que es importante agregar propiedades de eficiencia en la detección de los foto diodos o probar alguna ubicación estratégica para obtener señales eléctricas más grandes.

Lo siguiente que debe implementarse, son las propiedades de ionización del gas para obtener las cascadas de electrones que se buscan para obtener señales indicadoras del paso de partículas por el volumen del dispositivo, es por ello que agregamos las propiedades electromagnéticas del medio al mundo y obtuvimos lo siguiente:

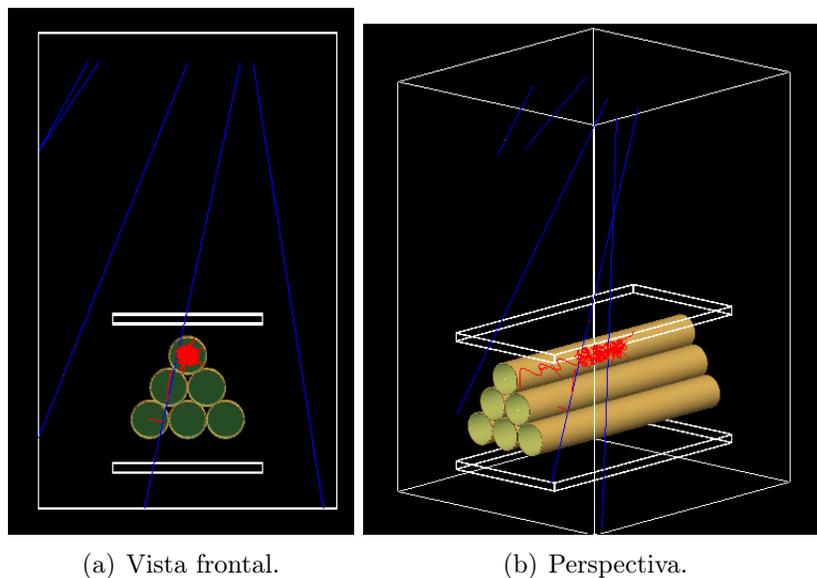


Figura 3.36: Se notan algunos electrones generados en una corrida de la simulación (desactivando las propiedades ópticas) en color rojo, mientras que los muones de prueba se muestran en color azul. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

Podemos notar que no se genera una cascada de electrones como es de esperarse, en cambio, el evento más notorio es un electrón orbitando una de las fibras, lo que implica que tiene bastante energía y por ello no decae rápidamente a la fibra. Debe ajustarse el código para que se muestren los electrones de bajas energías, que son los que prácticamente adquieren solo la componente de velocidad dada por el campo.

El url del repositorio con todos los scripts de la simulación se puede encontrar en la sección de anexos al final de este documento.

Con GEANT4 no se simulan los procesos de avalancha en tubo tipo Geiger-Müller.

3.6. Toma de datos

Para la obtención de amplitudes promedio y voltajes de operación, obtuvimos un conjunto de datos de 100 amplitudes medidas en el osciloscopio para 4 voltajes de operación distintos, eso para los 4 canales disponibles. El objetivo es un conjunto de datos de 1600 mediciones. Se muestra el prototipo de tabla para la toma de datos:

CANAL 2	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
Amplitud mV	170	110	180	140
	120	110	210	250
	150	130	310	150
	120	140	120	250
	120	140	180	260
	180	160	200	240

Figura 3.37: Tabla utilizada para la toma de datos para un solo canal. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Para el canal 6, que es el que se encuentra en el tubo superior de la pirámide, solo tomamos 300 de 400 mediciones previstas debido a que no funciona correctamente en el último voltaje de operación. Todas las mediciones fueron realizados en un intervalo de horario de 9:00 am a 1:00 pm debido a que observamos un mayor número de incidencias por intervalo de tiempo. En la sección de Anexos (A) podemos encontrar las tablas completas de valores, así como el link a los archivos de texto con la información.

3.7. Resultados

Tomamos las amplitudes promedio junto con su dispersión para los 4 canales, además de la frecuencia de cada amplitud. A continuación presento las gráficas obtenidas para cada canal.

Canal 6

Se muestran las amplitudes promedio obtenidas para el canal 6, junto con las barras que indican la dispersión de los datos.

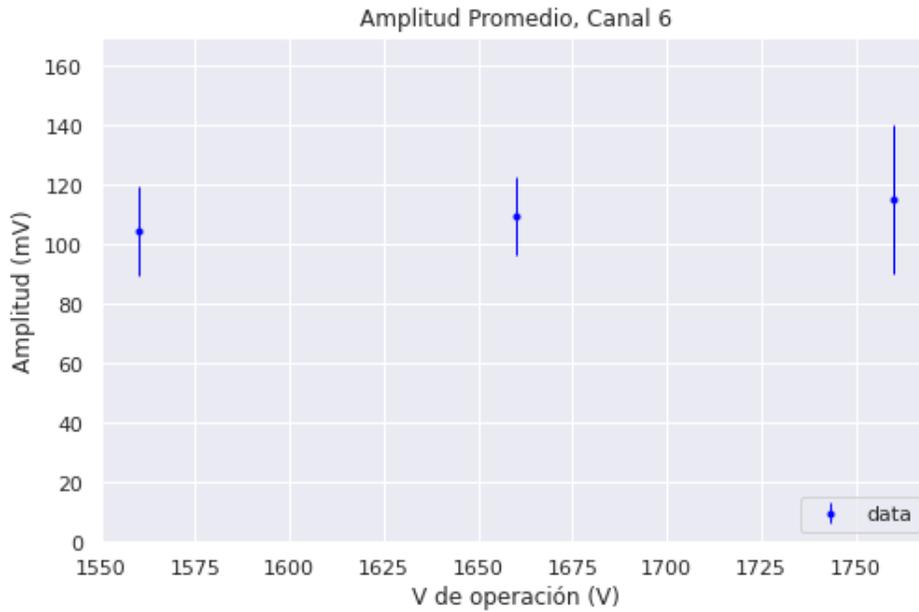


Figura 3.38: Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación en el canal 6. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Podemos apreciar menor dispersión (las barras de error son dadas por la desviación estándar) a -1660 V y un aumento considerable de la dispersión agregando 100 V.

Solo se tienen 3 valores de voltaje de operación debido a que en el voltaje $V=-1860$ V, parece ser una ruptura del dieléctrico en algún punto por lo que el capacitor no para de mostrar una descarga constante.

Ahora, se muestra el gráfico con las frecuencias para cada amplitud dado el voltaje de operación.

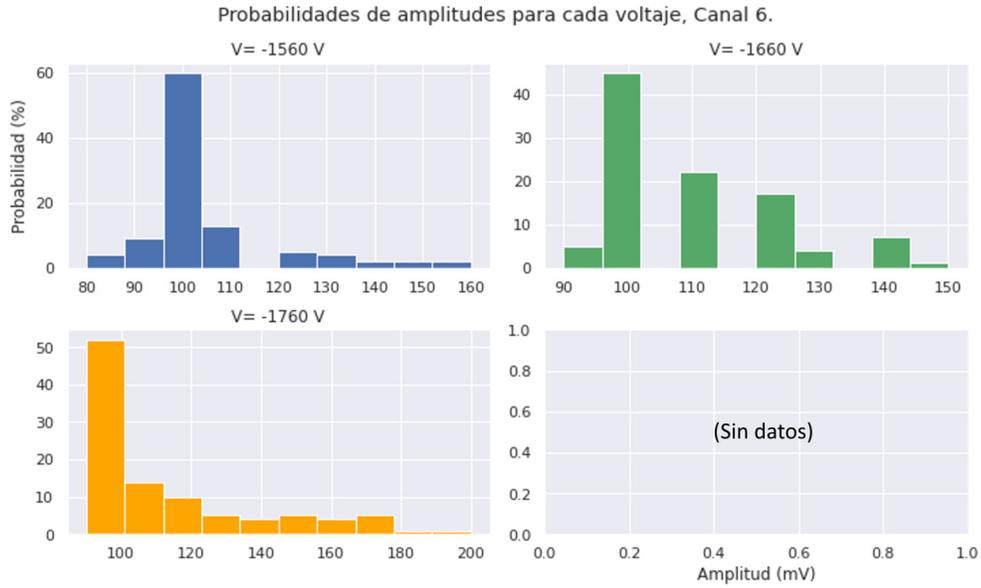


Figura 3.39: Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación, canal 6. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Es claro que el valor más probable para los 3 voltajes de operación es con amplitudes de 100 mV.

Si superponemos los gráficos anteriores obtenemos lo siguiente:

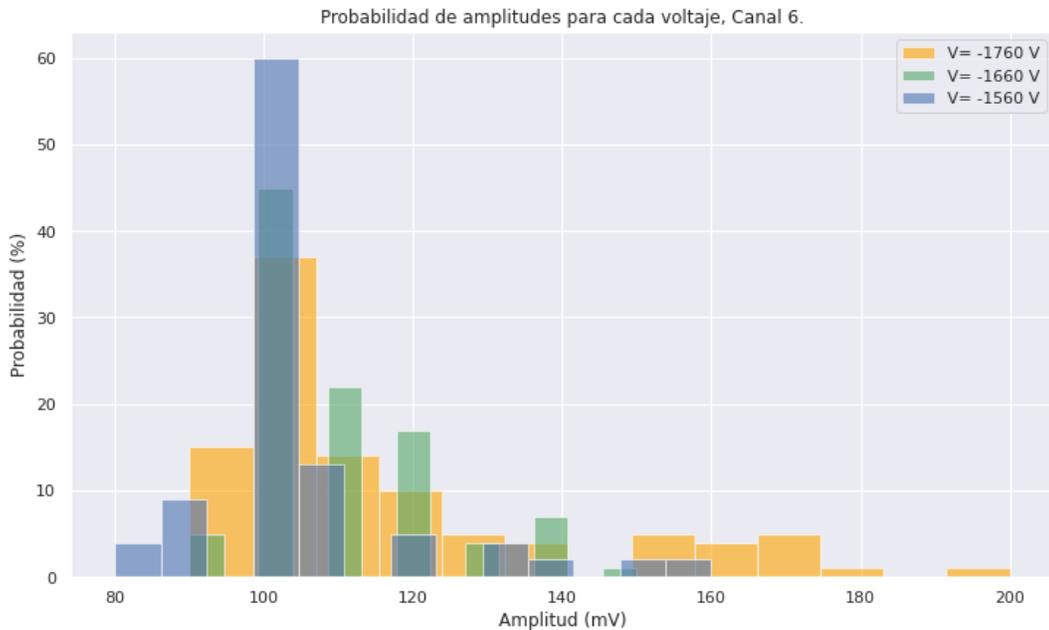


Figura 3.40: Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 6. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Tenemos un pico en 100 mV y luego observamos uno pequeño formándose en la región de 150 mV a 180 mV.

Canal 5

Para el canal 5, que es el tubo del lado izquierdo en el nivel central, tenemos la siguiente distribución de amplitudes promedio:

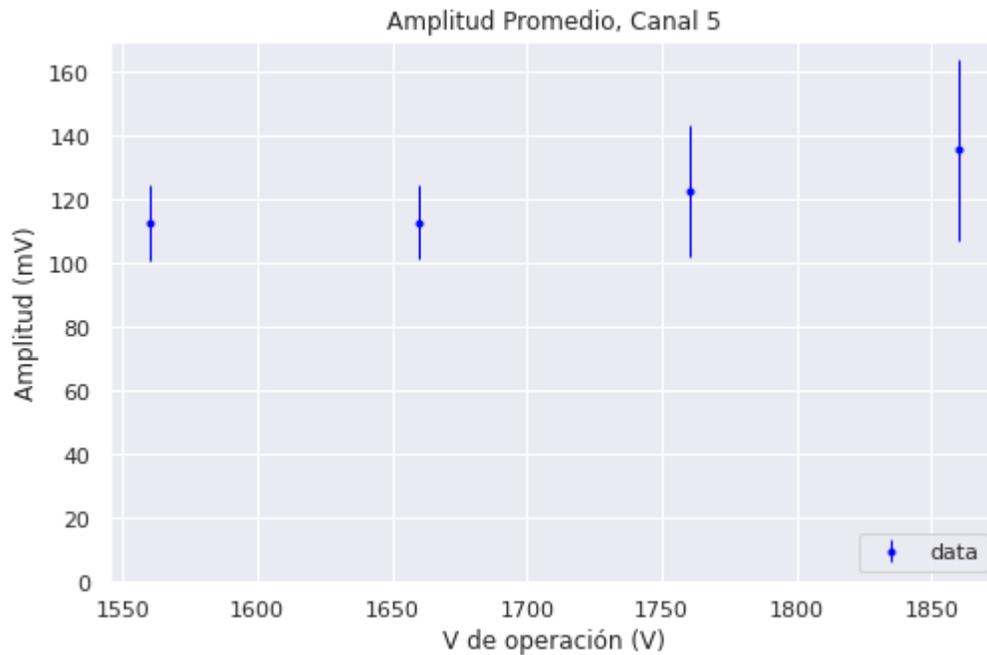


Figura 3.41: Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación, canal 5. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

Notamos una curva que asemeja una recta de pendiente positiva, el valor con menor dispersión es en -1660 V, tal como la amplitud aumenta con el voltaje, lo hace la desviación estándar.

Las gráficas de frecuencias son las siguientes:

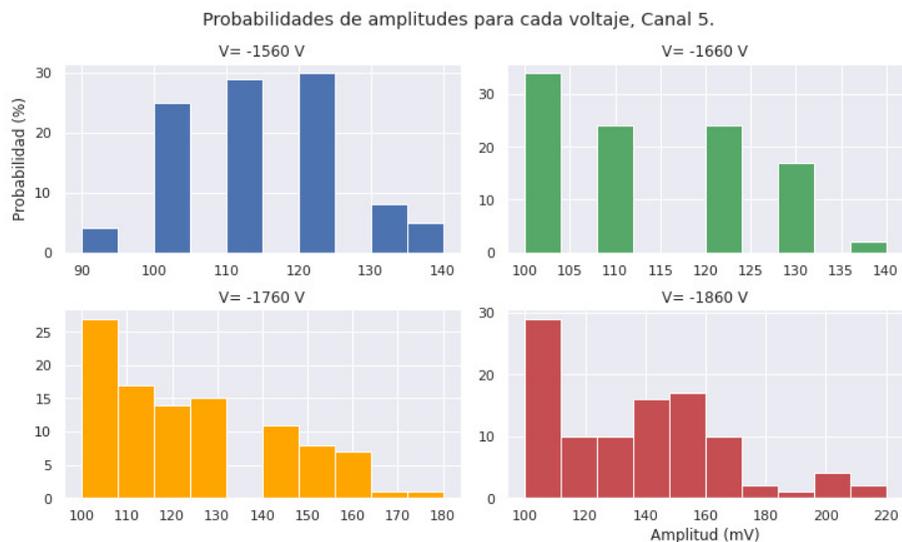


Figura 3.42: Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 5. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Se puede apreciar un máximo en las regiones de 100 mV a 120 mV, en la gráfica de tonalidad rojiza aparece un pico en 200 mV.

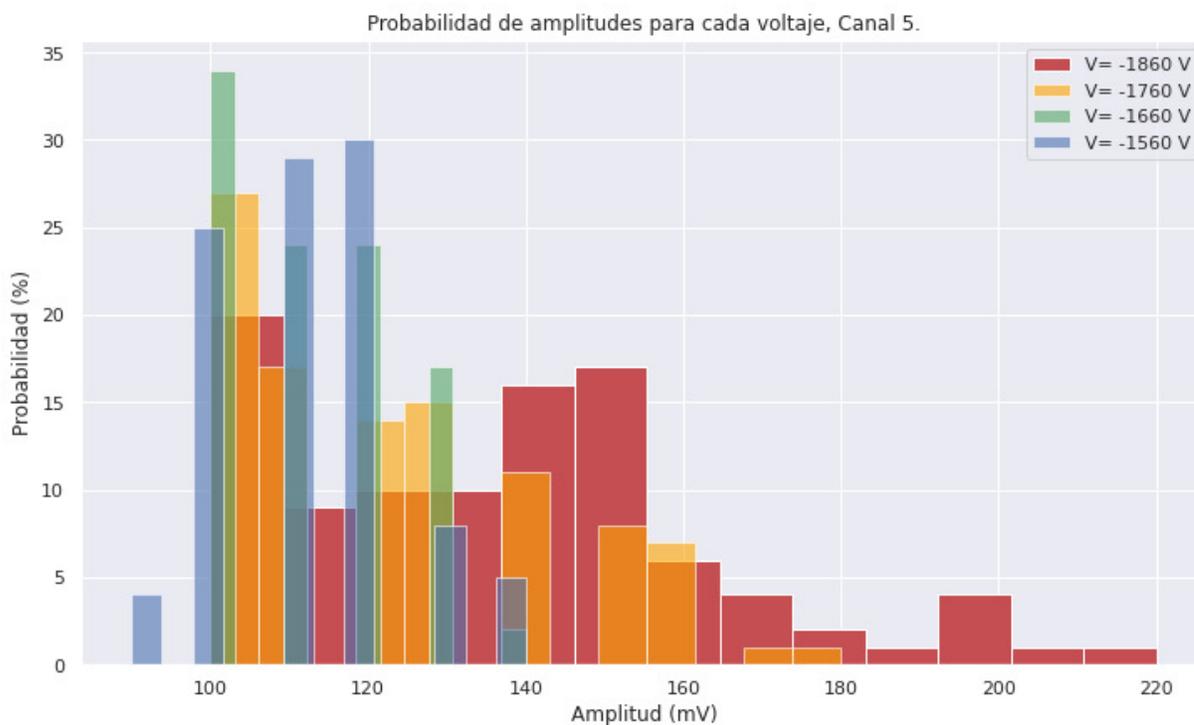


Figura 3.43: Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 5. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Notamos con facilidad el pico de 100 mV, pero aparecen nuevos máximos en la región de 140 mV a 160 mV y en 200 mV lo que podría incluso indicar un fenómeno de cuantización.

Canal 4

El canal 4, que se encuentra en el nivel medio del lado derecho, tiene la siguiente gráfica de amplitudes promedio:

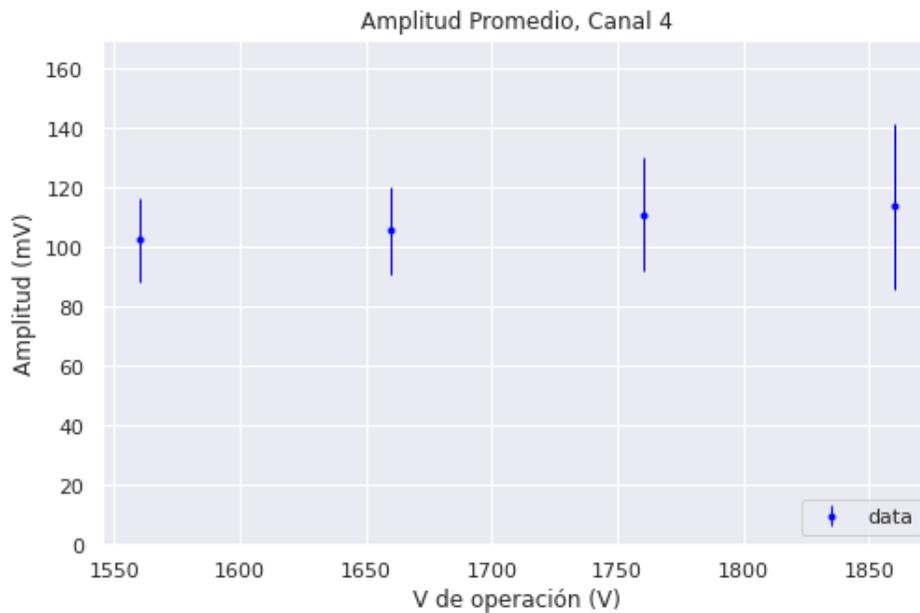


Figura 3.44: Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación, canal 4. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

La gráfica tiene una tendencia ascendente casi lineal donde los valores más pequeños de la dispersión se encuentran cuando el canal opera a -1560 V y -1660 V. Como en los canales anteriores las amplitudes promedio se encuentran entre 100 mV y 120 mV lo que debería indicar al menos un pico en la gráfica de frecuencias.

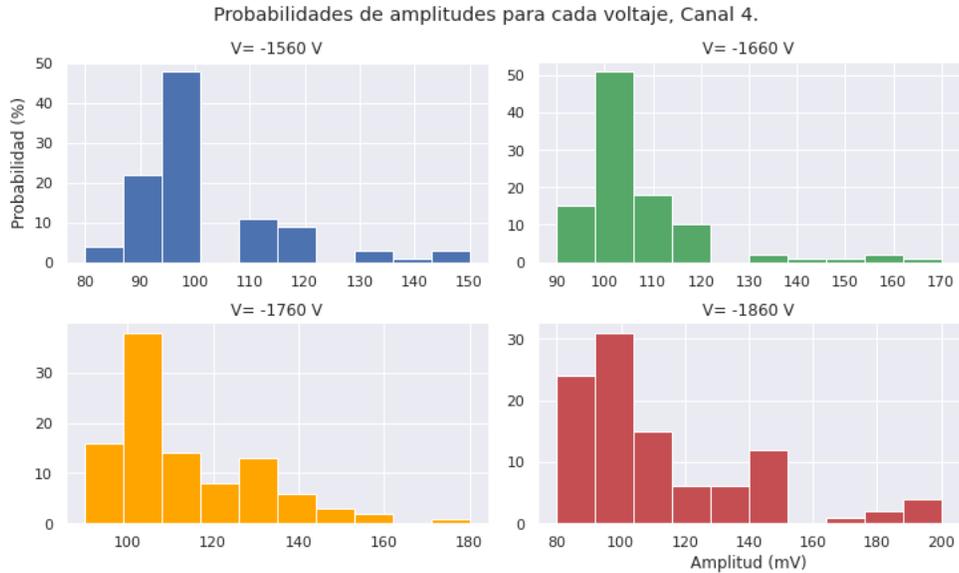


Figura 3.45: Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 4. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Notamos el pico principal en 100 mV y apariciones de picos en la región de 130 mV a 160 mV y un pequeño pico en el gráfico rojo de 200 mV.

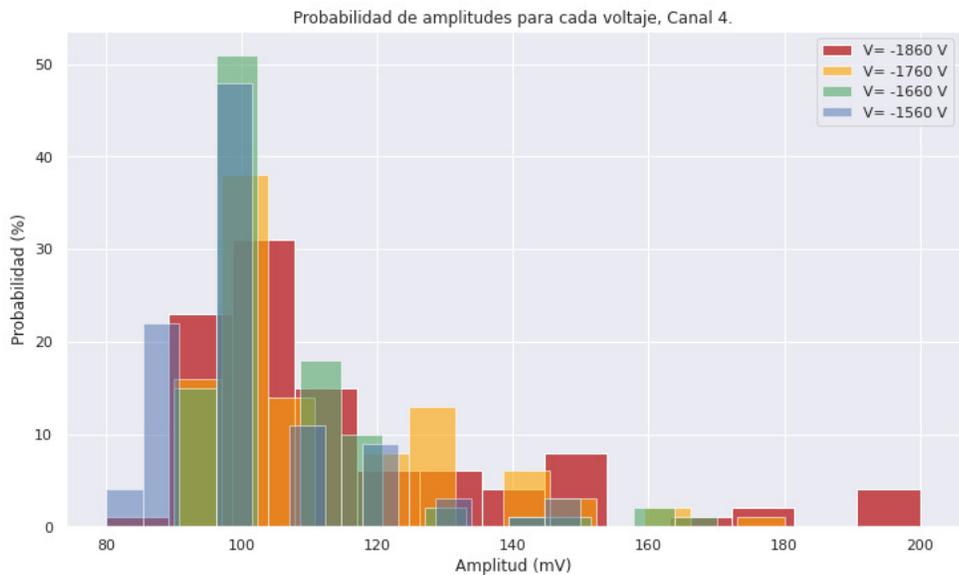


Figura 3.46: Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 4. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

De la superposición de los gráficos de frecuencias, podemos observar el máximo en una amplitud de 100 mV, un pico en 150 mV y otro en 200 mV.

Canal 2

El canal dos es el que se encuentra al centro en el nivel inferior. Su gráfica de amplitud promedio es la siguiente:

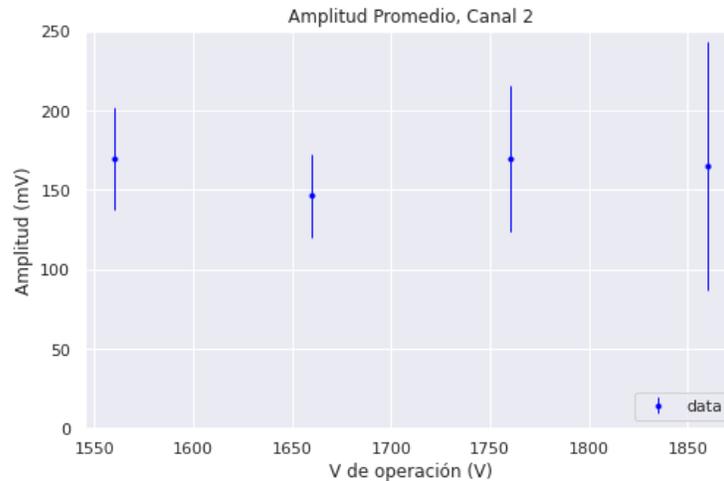


Figura 3.47: Gráfico de la amplitud promedio para cada voltaje de operación, canal 2. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Notamos un incremento en general de las amplitudes promedio con respecto a las otras gráficas, sin embargo vemos coincidencia en el valor mínimo de dispersión a un voltaje de operación de -1660 V. Su gráfico de frecuencias es el siguiente:

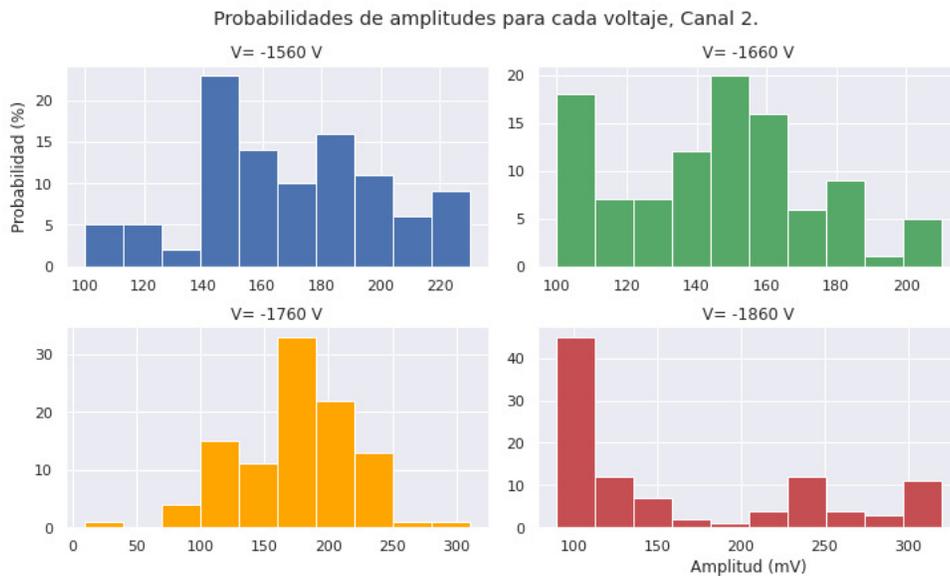


Figura 3.48: Gráficos de frecuencia para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 2. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Notamos picos bastante más variados en comparación a los otros canales, sin embargo es interesante notar que se encuentran en regiones similares (100 mV, 140-150 mV, 200 mV) pero observando un nuevo pico en la región de 300 mV.

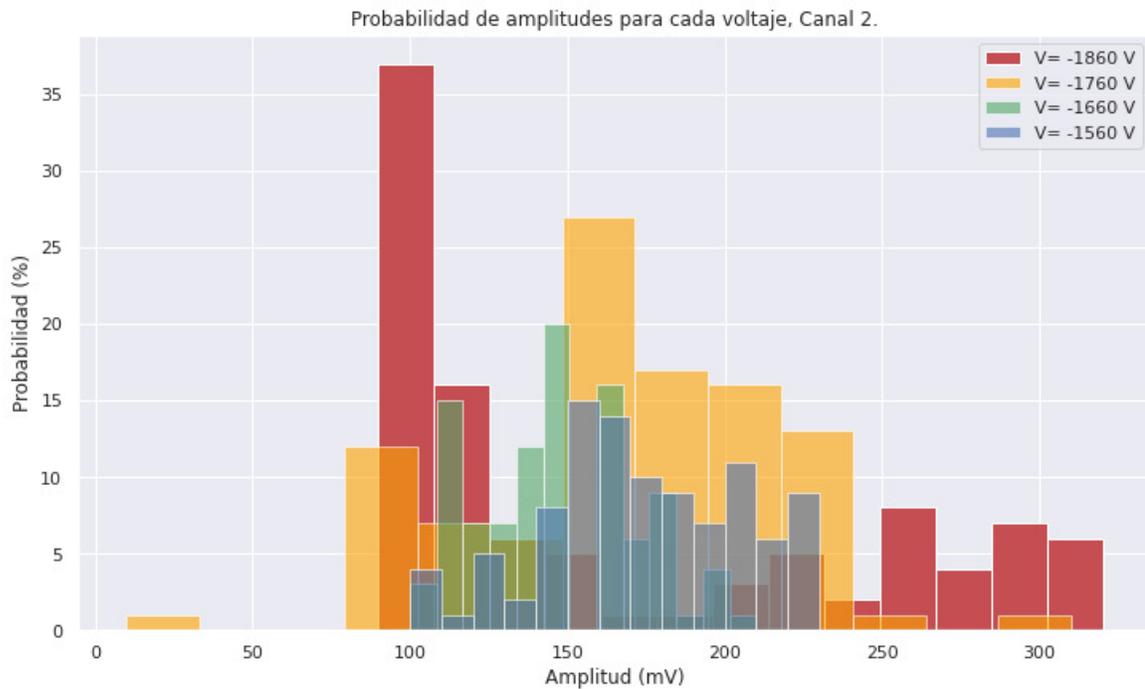


Figura 3.49: Superposición de frecuencias para los valores de amplitud obtenidos en cada voltaje de operación para el canal 2. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

En la superposición podemos notar un pico bien definido en 100 mV, otro en 150 mV, otro en la región de 200 mV y de 250 mV a 300 mV.

General.

Los tubos del dispositivo son muy similares, el objetivo es hacerlos casi idénticos. Podemos superponer todos los datos en un solo gráfico y resaltar una especie de función de tendencia

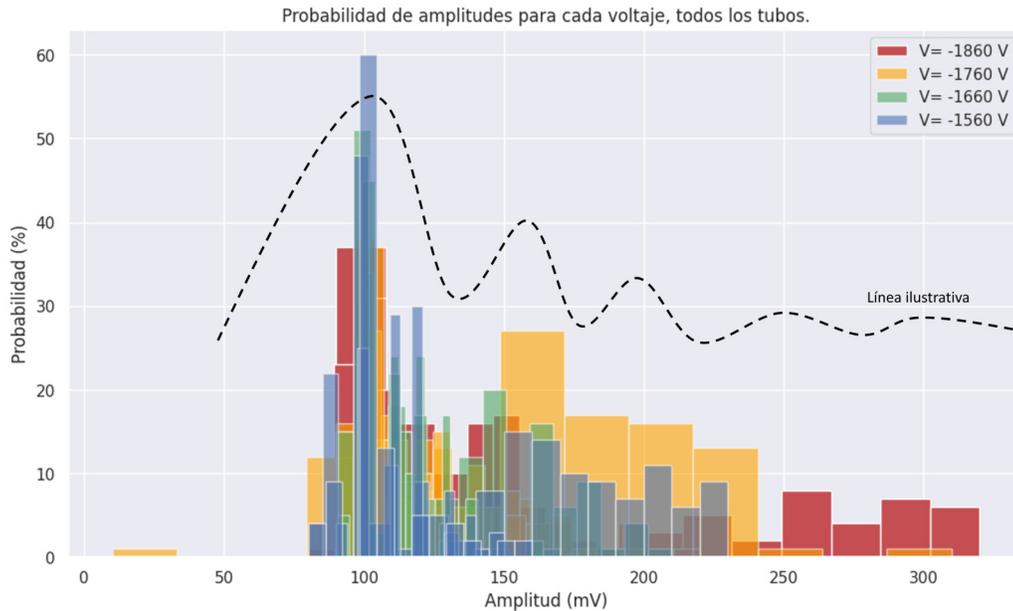


Figura 3.50: Se muestran las frecuencias de todas las mediciones realizadas para los cuatro tubos funcionales en el dispositivo junto con una línea que ilustra un comportamiento de máximos y mínimos cada 50 mV. Las mediciones fueron tomadas en días distintos. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

En todos los casos y para todos los voltajes observamos un máximo en 100 mV y máximos locales cada 50 mV.

Un fenómeno interesante también observado en las mediciones, es el acoplamiento de señales.

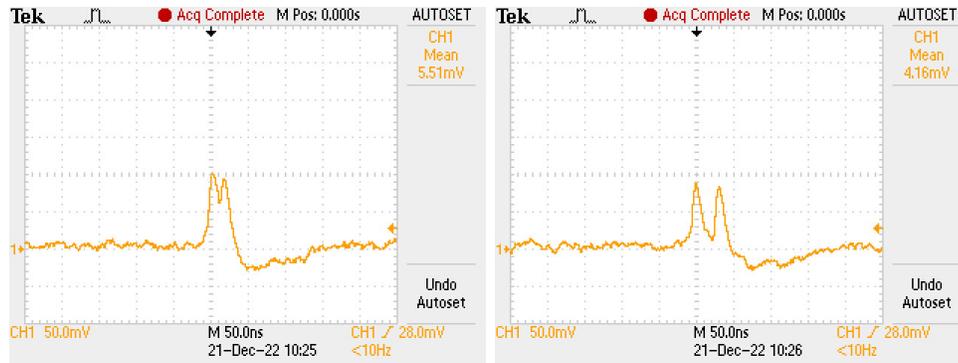


Figura 3.51: Señales acopladas observadas en el canal 4 operando con $V=-1700$ V. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Lo anterior podría deberse al paso de más de un rayo cósmico, alguna perturbación en el circuito, entre otros. Es un fenómeno que debemos seguir estudiando.

Conclusiones.

Tenemos un dispositivo que funciona de acuerdo a lo esperado tal y como se planeó en el inicio de este capítulo, sin embargo obtuvimos algunos resultados interesantes que resumimos a continuación.

Los resultados principales que me parecen resaltables son:

- La amplitud promedio de las señales y la dispersión de los datos aumentan conforme aumenta el voltaje de operación.
- Tenemos un mínimo de dispersión en -1660 mV.
- Notamos picos aproximadamente cada 50 mV con variaciones distintas según el canal.
- El valor más repetido para el dispositivo está en 100 mV. Es curioso que en todos los casos a diferentes voltajes, ese valor siempre se repite.

Los picos bien definidos podrían ser indicadores de un fenómeno de cuantización de la energía debido a que en los cuatro canales donde se realizaron las pruebas se muestran picos separados por intervalos más o menos iguales, para seguir estudiando dicha observación se requiere un conjunto de datos mayor para resaltar la tendencia

de lo datos.

Con base en la observación anterior el voltaje óptimo de operación se debe definir con base en el objetivo que busquemos con el dispositivo, una menor dispersión implica centrarnos en una región pequeña que en este caso será el pico de 100 mV a un voltaje de operación de -1660 V. Si queremos por ejemplo estudiar si precisamente los picos se encuentran bien definidos, podemos trabajar con -1760 V o -1860 V. Como el objetivo principal es determinar trayectorias de partículas en realidad tenemos detecciones en los 4 voltajes, sin embargo podemos esperar más amplitudes rondando los 100 mV trabajando a -1660 V lo que nos brindaría cierto control en las muestras de datos.

Capítulo 4

Sistema de trazado de rayos cósmicos

Uno de los objetivos del proyecto de tesis, es obtener los ángulos de incidencia de alguna partícula en el dispositivo. Para ello obtendremos la posición en el eje z para construir el ángulo en el plano ZY y del mismo modo en el plano XY como se muestra a continuación:

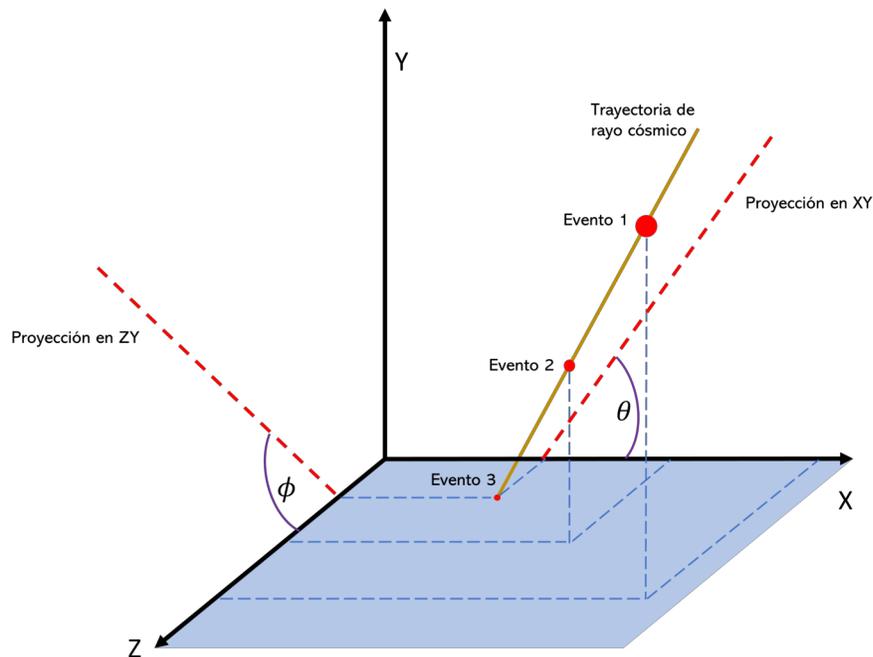


Figura 4.1: El rayo cósmico incidente tiene una proyección en los planos XY y ZY, si obtenemos los ángulos de dichas proyecciones, los ángulos de incidencia en el dispositivo. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Podemos entonces dividir el análisis en dos partes cuyo desarrollo se encuentra en las secciones siguientes.

4.1. Posición en eje z.

La posición en el eje z, la determinaremos a lo largo de cada una de las fibras. Supongamos que la cascada de electrones incide en un punto arbitrario a lo largo de la fibra, si conocemos el tiempo en el que ocurre el evento de ionización t_0 y el tiempo en el que recibimos la señal en uno de los extremos de la fibra t_1 , podemos estimar la distancia a la que ocurrió el evento con las propiedades del material.

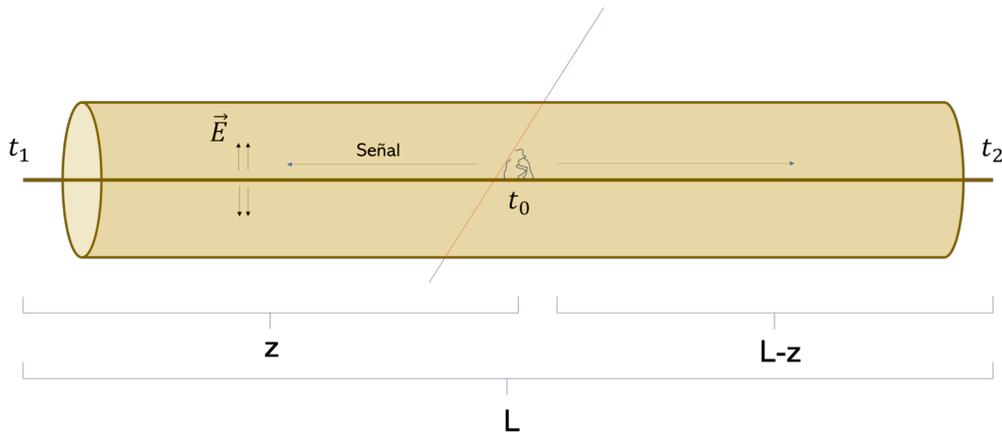


Figura 4.2: Se muestra la vista lateral de uno de los tubos con un rayo cósmico incidente que desencadena un evento de ionización enviando una señal por la fibra. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

De la figura anterior, podemos ver que la posición en z será dada por

$$z = c' \Delta t$$

donde tenemos

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

y c' es la velocidad de la energía en las fibras de oro.

Si medimos en el otro extremo tendremos

$$L - z = c' \Delta t'$$

$$z = L - c' \Delta t'$$

en donde tenemos

$$\Delta t' = t_2 - t_0$$

Podemos obtener t_0 como el tiempo medio entre los tiempos de detección en los veto detectores, suponiendo que la fibra está justo a la mitad es una buena aproximación.

$$t_0 = \frac{t_{veto2} - t_{veto1}}{2}$$

Tomando en cuenta la función que depende de más variables, tendemos que

$$z = L - \left(t_2 - \frac{t_{veto2} - t_{veto1}}{2} \right) c'$$

De lo anterior podemos obtener el error en la posición que va como

$$\Delta z(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left[\sum \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \right)^2 \delta x_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Si sustituimos entonces todas las variables de las que depende z , obtenemos

$$\Delta z = \left[\delta L^2 + c'^2 \delta t_2^2 + \frac{1}{4} c'^2 (\delta t_{veto2}^2 + \delta t_{veto1}^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Con las expresiones anteriores obtendremos un punto sobre el eje z que aproxima la posición del rayo para cada tubo en el que se tuvo incidencia, por lo que basta trazar una recta que pase por dichos tubos para obtener un ángulo de incidencia en el plano YZ.

Ahora bien, podemos hacer un análisis rápido de la expresión para z

$$z = L - (t_2 - \frac{t_{veto2} - t_{veto1}}{2})c'$$

Para así saber hasta qué orden deben ser capaces nuestros instrumentos de medición. Obtenemos entonces una expresión para los tiempos

$$t_2 - \frac{t_{veto2} - t_{veto1}}{2} = -\frac{z - L}{c'}$$

Ahora, c' es del orden de 10^8 m, z de 10^{-1} m al igual que L .

$$t_2 - \frac{t_{veto2} - t_{veto1}}{2} \approx -\frac{10^{-1}}{10^8}$$

Resumiendo la expresión anterior, el orden de los tiempos a medir debe ser

$$t \approx 10^{-9}$$

Es decir, necesitamos dispositivos con la capacidad de medir tiempos del orden de 10^{-9} s o bien ns. Un osciloscopio convencional como los que se tienen en el laboratorio llega a ese orden.

Finalmente podemos obtener la recta formada por los puntos obtenidos y calcular el ángulo de la proyección en el plano ZY. Al interesarnos solo el ángulo, basta con utilizar la ecuación

$$\text{arcTan}(m) = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (4.1)$$

4.2. Ángulo de incidencia

Para obtener el ángulo de incidencia ahora nos situamos en el plano XY, que nos dará la siguiente vista transversal del rayo cósmico atravesando el dispositivo.

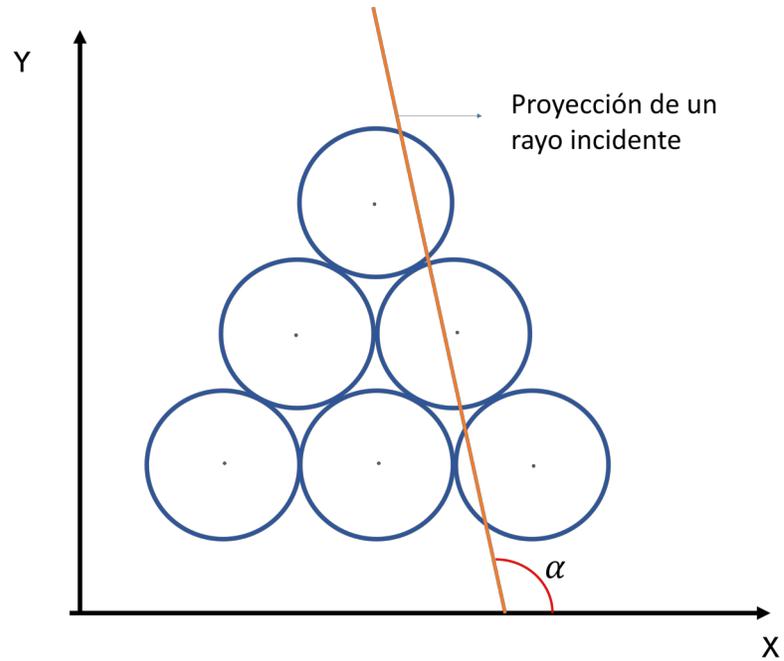


Figura 4.3: Se muestra la proyección del rayo incidente en el plano XY. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Nosotros podemos obtener entonces un ángulo α respecto al eje X. Si nos centramos en un tubo por el cual atraviesa el rayo, podemos destacar una circunferencia que es atravesada por una recta secante, que en la mayoría de los casos formará una cuerda, tal y como se muestra a continuación

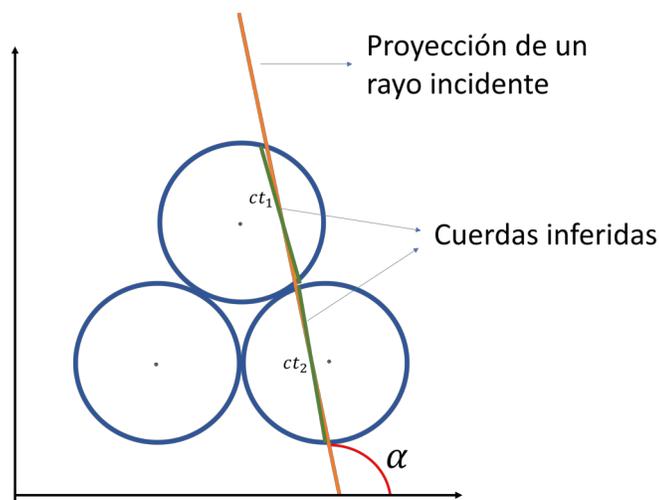


Figura 4.4: En verde podemos ver las cuerdas que buscamos aproximar en el análisis, al obtener una recta aproximada de ambas, obtendremos un ángulo aproximado de incidencia en el plano XY. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Si comparamos 2 tubos y encontramos las cuerdas cuya pendiente coincide, obtendremos la recta por la cual pasó el la partícula. En términos vectoriales, debemos encontrar los vectores \vec{L}_1 y \vec{L}_2 de modo que se cumpla que el ángulo entre ellos es de 0° o bien que el producto cruz es el vector nulo.

Para encontrar los vectores \vec{L} tenemos su módulo ya que lo podemos medir de acuerdo con el tiempo que dura la partícula pasando por el tubo, que sería la diferencia entre la señal del primer tubo y el inicio de la señal en el segundo. El módulo de \vec{L} va como

$$|\vec{L}| = ct$$

donde c es la velocidad de la partícula, interesándonos un muón.

Observemos pues la siguiente figura

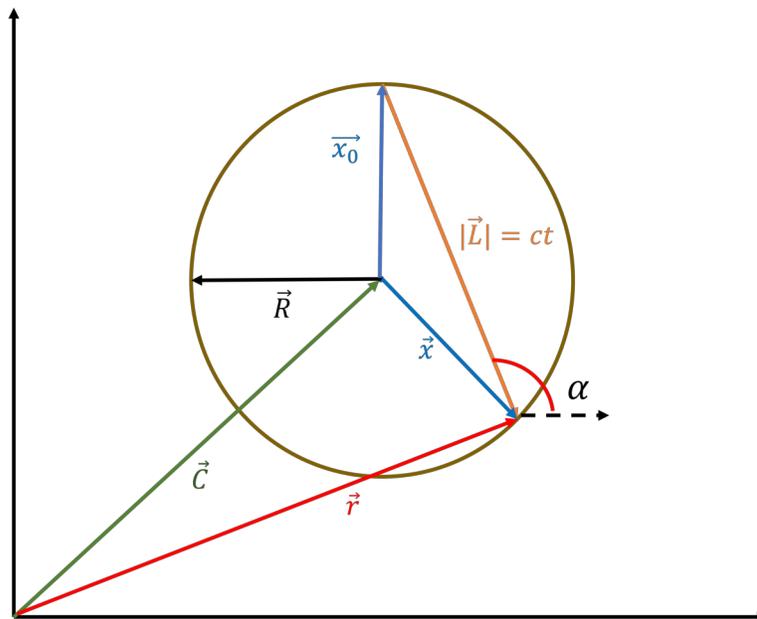


Figura 4.5: Para parametrizar el sistema tenemos los vectores \vec{r} y \vec{C} . El vector \vec{r} es el vector del origen a un punto sobre la circunferencia, el vector \vec{C} indica en donde se sitúa el centro de la circunferencia. El vector \vec{R} es el vector del radio de la misma, \vec{L} es el segmento de la trayectoria que nos interesa inferir, finalmente \vec{x}_0 y \vec{x} que son los vectores que indican los extremos de \vec{L} . *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

La información que tenemos es $|\vec{L}|$ y $|\vec{R}|$, junto con las coordenadas del centro del

círculo \vec{C} . De la figura podemos obtener las siguientes relaciones:

$$\vec{L} = \vec{x} - \vec{x}_0 \quad (4.2)$$

y que

$$|\vec{r}| = |\vec{x} + \vec{C}| \quad (4.3)$$

De la figura, también podemos obtener

$$|\vec{R}| = |\vec{x}| \quad (4.4)$$

De la expresión 4.2 podemos obtener lo siguiente:

$$\vec{x} = \vec{L} + \vec{x}_0$$

$$|\vec{x}|^2 = |\vec{L} + \vec{x}_0|^2$$

Por lo tanto

$$|\vec{L} + \vec{x}_0|^2 = |\vec{R}|^2$$

$$(\vec{L} + \vec{x}_0) \cdot (\vec{L} + \vec{x}_0) = |\vec{R}|^2$$

$$|\vec{L}|^2 + |\vec{x}_0|^2 + 2(\vec{L} \cdot \vec{x}_0) = |\vec{R}|^2$$

$$\vec{L} \cdot \vec{x}_0 = \frac{1}{2}(|\vec{R}|^2 - |\vec{L}|^2 - |\vec{x}_0|^2)$$

Finalmente llegamos a una expresión para \vec{L}

$$\vec{L} = \frac{1}{2}(|\vec{R}|^2 - |\vec{L}|^2 - |\vec{x}_0|^2) \cdot \vec{x}_0^{-1} \quad (4.5)$$

Sólo queda asignar valores aleatorios de \vec{x}_0 a lo largo de la circunferencia para obtener los \vec{L} correspondientes. Un problema de la expresión anterior es que en ciertos casos podríamos obtener problemas de convergencia.

Una opción, sin replantear todo el problema, es partir del punto x_0 , recorriendo la circunferencia asignando puntos x (lo que es fácil para una computadora) hasta ob-

tener la distancia euclidiana igual al módulo de \vec{L} .

Una vez que se obtienen los posibles vectores \vec{L} para un tubo, deberá calcularse del mismo modo el arreglo de vectores \vec{L} para el segundo tubo. Una vez que se tienen los dos arreglos, se deben comparar y tomar aquellos vectores que son colineales y que cumplan lo siguiente:

$$|\vec{x}' - \vec{x}_0| \leq \textit{tolerancia}$$

donde los vectores primados, son los del tubo que se encuentre más abajo en el arreglo experimental.

El algoritmo a desarrollar es el siguiente:

1. Dados $|\vec{r}|$, \vec{c} y $|\vec{L}|$.
2. Elegir un \vec{x}_{0i} , podemos tomar $\vec{c} + (r, 0^\circ)$.
3. Tomar un \vec{x}_j evaluando puntos por la circunferencia hasta cumplir:

$$|\vec{L}| = |\vec{x}_j - \vec{x}_{0i}|$$

4. Obtener L_i
5. Descartar valores cuya pendiente entre los puntos x_0 y x , no esté en rango, el rango se puede obtener con los veto detectores.
6. Guardar arreglo con $[x_0, x, L]$.
7. Repetir pasos para todas x_{0i} recorriendo desde 0 a π .
8. Hacer pasos 2-7 para cada tubo que presenta detección.
9. Calcular $\vec{L}_i \times \vec{L}_j$.
10. Tomar el par cuyo vector de producto cruz sea cercano a $(0,0,0)$, el módulo de este vector es el error por lo que podemos elegir cierta tolerancia. También podemos calcular simplemente el ángulo entre ambos vectores y buscar π con cierta tolerancia.

11. Obtener el vector L promedio y su ángulo respecto al eje x .

El programa se escribió utilizando Python. Podemos encontrar el repositorio en el Apéndice A.

Primero se prueba que el cálculo de los puntos aleatorios sea el correcto, para ello se gráfica el mapa de puntos

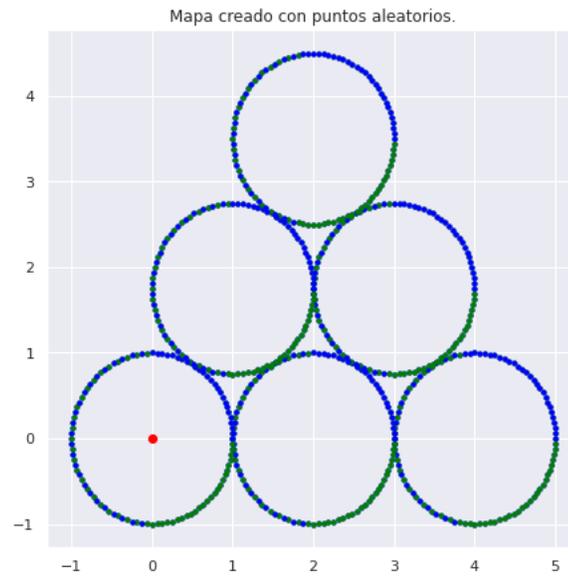


Figura 4.6: Mapa de puntos creado con los puntos aleatorios x_0 y sus respectivos x . *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Se dieron diferentes valores de L para realizar una prueba del código y lo obtenido es lo siguiente:

- Una solución sencilla es hacer $L = 2R$ de modo que se supone que la partícula atraviesa los tubos tocando el centro. Se corrió el código probando el tubo de la punta de la pirámide con los dos tubos que tiene en contacto.

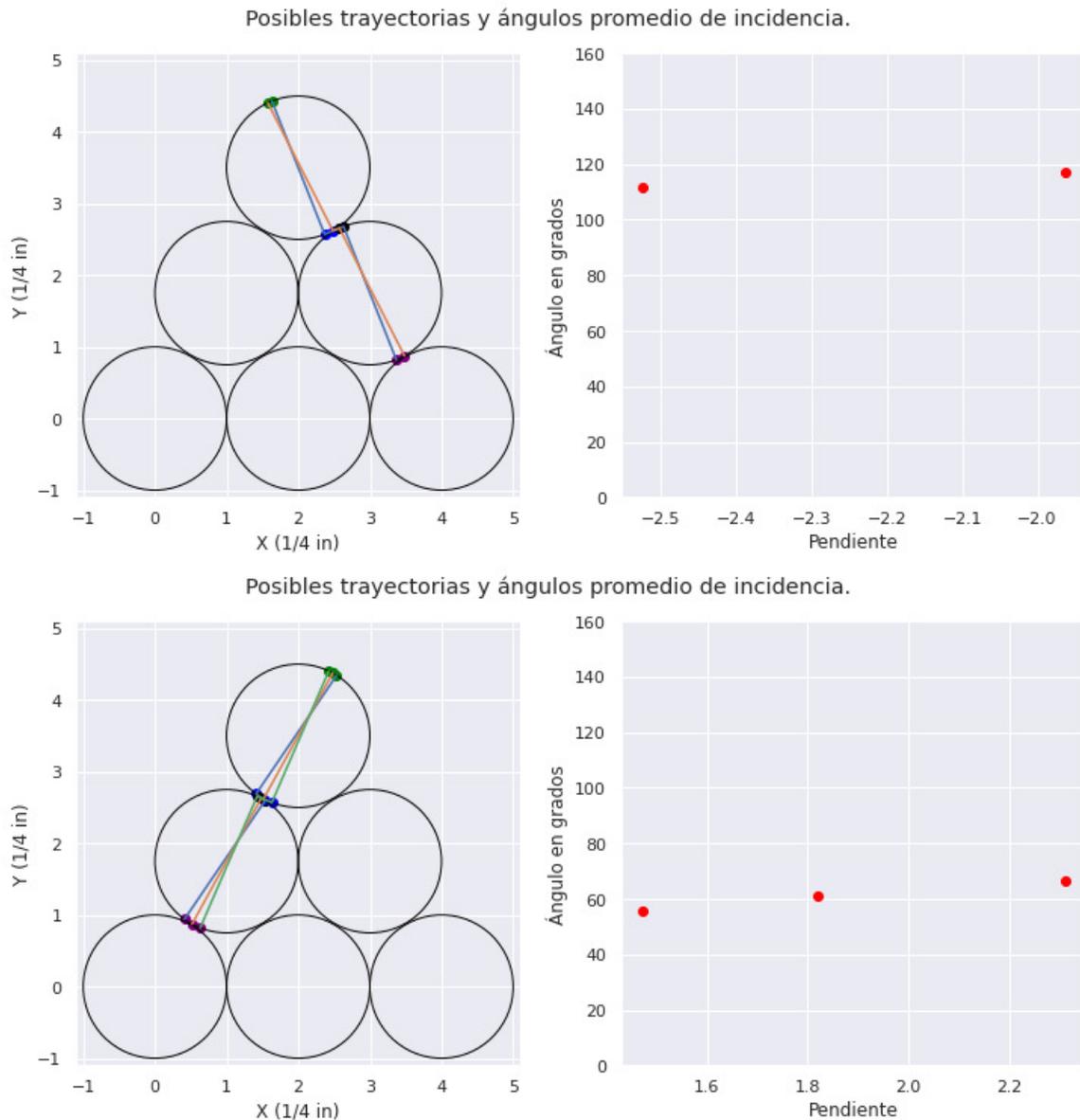


Figura 4.7: Gráficos con las trayectorias construidas con un error máximo de 4 grados y los pares ángulo pendiente de cada recta. Para $L_1 = L_2 = 2R$. *Figura hecha por José Francisco Ambríz Gutiérrez.*

Podemos apreciar que las trayectorias son las esperadas, básicamente una recta que pasa por el centro de cada círculo. La distribución angular está reducida a un intervalo pequeño de unos 8 grados.

- Ahora se eligió una trayectoria aleatoria con valores $L_1 = 1.54R$ y $L_2 = 1.45R$, para obtener lo siguiente:

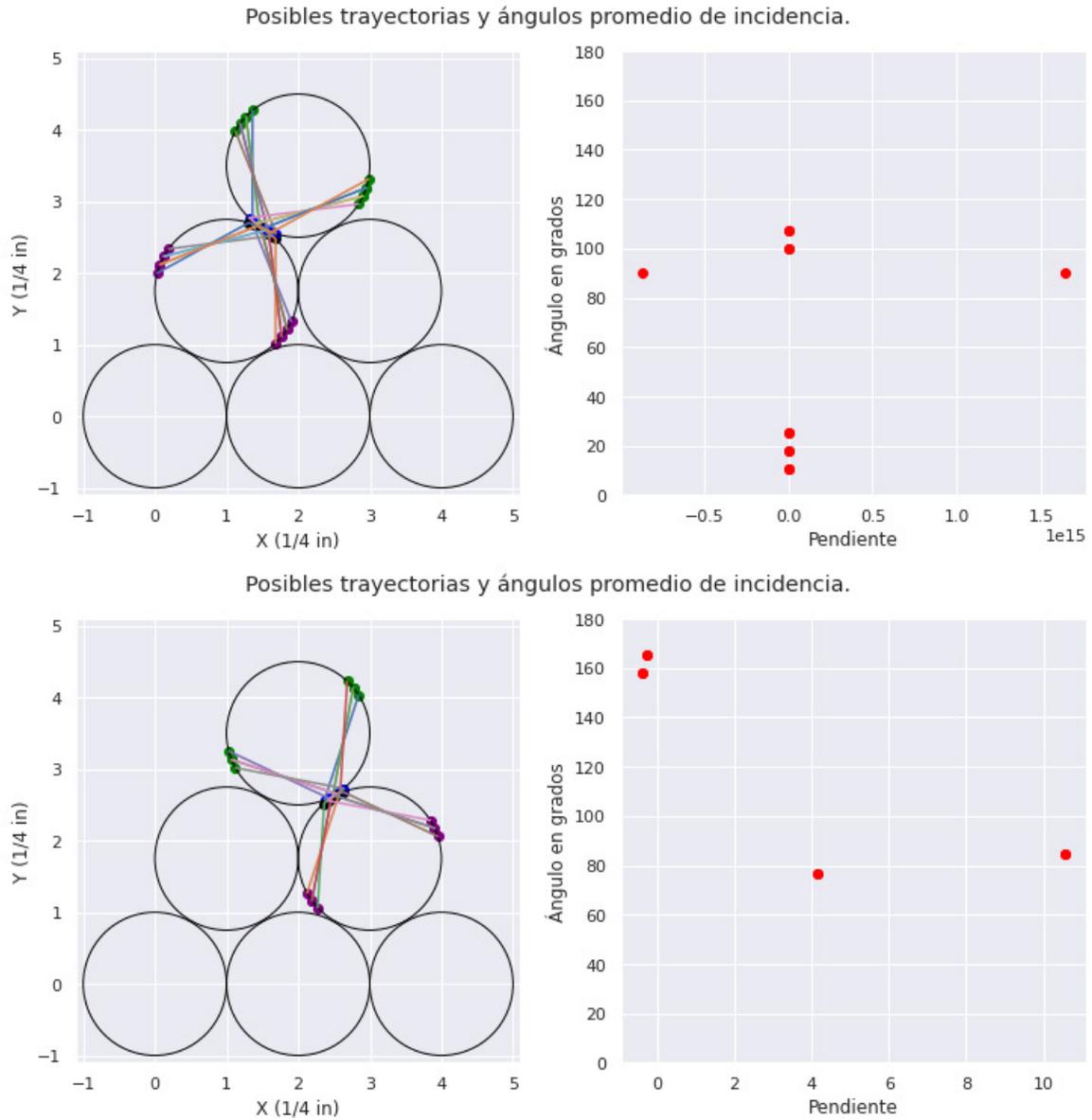


Figura 4.8: Gráficos con las trayectorias construidas con un error máximo de 4 grados y los pares ángulo pendiente de cada recta. Para $L_1 = 1.54R$ y $L_2 = 1.45R$. *Figura hecha por José Francisco Ambriz Gutiérrez.*

Podemos apreciar trayectorias cruzadas tal como es de esperarse debido a que existe un eje de simetría que marca al menos dos casos donde se cumplen las condiciones del problema. Notamos los intervalos angulares un poco más grandes, sin embargo suficientemente pequeños para hacer buenas estimaciones.

La observación principal es notar que existe un eje de simetría con el cual pode-

mos obtener dos posibles trayectorias, una manera efectiva de reducir a uno la posible trayectoria es restringir las pendientes de las rectas a un intervalo dado por la geometría del sistema, más concretamente, un intervalo dado por los veto-detectores. Ya que se busca que la partícula atraviese ambos dispositivos, basta con determinar los intervalos permitidos y agregar un filtro al programa.

Aún no obtenemos valores reales para las longitudes atravesadas por los rayos cósmicos debido a que el dispositivo de medición del laboratorio no tiene tanta sensibilidad como para medir tiempos del orden de pocos pico segundos.

Si juntamos los dos procesos anteriores obtendremos una aproximación de la recta en 3 dimensiones por donde incidió el rayo ya que se cuenta con el ángulo de incidencia en el plano YX y el ángulo de incidencia en el plano YZ.

Conclusiones.

Se tiene un algoritmo funcional que obtiene las trayectorias de las partículas incidentes en dos componentes, la primera en el eje Z y la segunda en el plano XY tal y como mostramos en la sección anterior.

El algoritmo tiene una parte analítica y una que utiliza aproximaciones con inteligencia artificial. En papel, funciona correctamente, pero no se lograron realizar pruebas con datos obtenidos del dispositivo ya que la precisión del osciloscopio no fue suficiente (requeridos 1-40 ps) por lo que aún se debe probar el algoritmo con datos reales obtenidos de mediciones directas con el dispositivo.

Capítulo 5

Discusión y conclusiones

El dispositivo funciona como se esperaba, con voltajes cercanos a 1600 V, sin embargo es necesario construir uno nuevo debido a la falta de los dos canales que se perdieron en el proceso de caracterización.

Tenemos un sistema de detección eficiente ya que básicamente tenemos 4 canales funcionando correctamente. Observamos varios picos definidos en la obtención de datos para cada canal lo que podría indicar fenómenos de cuantización de la energía no podemos concluir lo anterior con certeza debido a que las muestras de datos son pequeñas y el ambiente no está totalmente controlado. La incidencia de radiación cósmica en la ciudad de León, Gto. incrementa considerablemente durante las mañanas y hasta las 3pm aproximadamente, reduciéndose después de este horario.

Respecto al sistema de trazado, tenemos un modelo para identificar la posición en el eje Z de modo que se puede trazar una trayectoria en el plano ZY por cada capa en Y. Además se cuenta con un algoritmo funcional que obtiene aproximaciones de la componente de la trayectoria en el plano XY y su distribución angular en ese plano.

Es importante mencionar que los algoritmos no fueron probados con datos reales ya que no se cuenta con el equipo de medición necesario para obtener las señales con la sensibilidad necesaria que deben estar en el rango de 1 a 40 ps.

No tenemos aún los veto detectores funcionando en el dispositivo, sin embargo se ilustra correctamente su funcionamiento en la simulación, sin embargo esa sección es mejorable debido a que no se logró representar aún la eficiencia de los fotodiodos y las cascadas de ionización que es el proceso principal para el funcionamiento del dispositivo.

Podemos utilizar el SDTRC en bastantes ámbitos ya que funciona con radiación ionizante, por lo que podremos detectar dichas partículas aunque la fuente no sea exactamente el cosmos. El dispositivo es orientable así que podemos utilizarlo de igual manera en cualquier configuración apuntando la pirámide hacia el posible origen de la radiación si lo que se busca es trazar una trayectoria.

Capítulo 6

Trabajo Futuro

Para el trabajo a futuro se tiene el siguiente listado de actividades:

- La construcción de un dispositivo nuevo con los seis canales funcionales y con la adición de los veto-detectores también funcionales.
- Experimentos con ambiente controlado: controlar el gas interior en el dispositivo usando una mezcla bien conocida como podría ser la de argón y metano. Realizar mediciones con un haz de partículas controlado como puede hacerse con el Test Beam de Fermilab.
- Se debe descifrar el problema de la cascada de ionización en la simulación de funcionamiento ya que es una herramienta altamente efectiva para la ilustración de los principios que están presentes en la operatividad del "Sistema de Detección y Trazado de Radiación Cósmica".
- También queda a futuro iniciar un conjunto de datos más grande para obtener resultados con mayor fiabilidad por lo que se debe desarrollar un sistema de adquisición de datos automático preferentemente y con la suficiente precisión de modo que la información obtenida nos permita trazar correctamente las posibles trayectorias de las partículas incidentes.

Bibliografía

- [1] Marc A. Shampo, PhD, Robert A. Kyle, MD, and David P. Steensma, MD. (2011). Hans Geiger—German Physicist and the Geiger Counter. 5 Mayo 2022, de National Library of Medicine.
Sitio web: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3228631/>
- [2] CERN. Cosmic rays: particles from outer space. 24 de marzo del 2022, de CERN Accelerating science Sitio web: <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>
- [3] T.K. Gaisser and T. Stanev . (2005). Cosmic Rays. 24 de marzo del 2022, de NASA Sitio web: <https://pdg.lbl.gov/2005/reviews/cosmicrayrpp.pdf>
- [4] Leo, W.R. (1994). Ionization Detectors. In: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2_6
- [5] N. Angert GSI. ION SOURCES. 6 de abril del 2022, de GSI, Darmstadt, Germany Sitio web: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/001/26001458.pdf
- [6] Gorges Charpak. (1992). Electronic Imaging of Ionizing Radiation with Limited Avalanches in Gases. 5 Mayo 2022, de Nobelprize.
Sitio web: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1992/charpak/lecture/>

- [7] Cerrito, L. (2017). Scintillation Process and Light Detectors. In: Radiation and Detectors. Graduate Texts in Physics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53181-6_9
- [8] Tavernier, F., Steyaert, M. (2011). From light to electric current—The photodiode. In: High-Speed Optical Receivers with Integrated Photodiode in Nanoscale CMOS. Analog Circuits and Signal Processing, vol 5. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9925-2_3
- [9] Robert Eisberg, Robert Resnick. (1985). Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles. Segunda edición. Estados Unidos: John Wiley and Sons.
- [10] David J. Griffiths. (1999). Introduction to Electrodynamics. Fourth Edition. United States: Pearson.
- [11] Hayt, W. H., Kemmerly, J., Durbin, S., Hernández Mata, G., Witemberg Wudka, N., & Vega Salinas, A. (2007). Análisis de circuitos en ingeniería (7a. ed.). México D. F.: McGraw-Hill.
- [12] Trimble, SketchUp. Disponible en: <https://www.sketchup.com/es/plans-and-pricing/sketchup-free>
- [13] Eljen Technology, "FAST TIMING PLASTIC SCINTILLATOR EJ-232, EJ-232Q", Disponible en: <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-232-ej-232q>

Apéndice A

Anexos

- Repositorio con la simulación del funcionamiento:

<https://github.com/PepoAmbriz/SDTRC-functionation-simulation>

- Repositorio con el algoritmo de trazado y gráficos obtenidos:

<https://github.com/PepoAmbriz/SDTRC-trazado-y-graficos>

- Carpeta con datasets obtenidos y galería de algunas señales obtenidas:

https://drive.google.com/drive/folders/1xXRWU8uX6cUJecHNRzb9kCPmzjy-5-cI?usp=share_link

Tablas de datos obtenidas para los 4 canales funcionales:

Tabla A.1: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 2 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 2	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
Amplitud mV	170	110	180	140
	120	110	210	250
	150	130	310	150
	120	140	120	250
	120	140	180	260
	180	160	200	240
	110	110	180	240

Tabla A.1: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 2 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 2	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	160	130	220	270
	150	150	210	150
	160	110	250	250
	160	180	150	270
	140	140	200	300
	130	120	220	300
	200	110	220	300
	140	100	230	220
	100	100	100	250
	150	160	230	200
	150	170	230	180
	200	120	200	230
	100	120	210	230
	130	130	150	250
	200	160	200	300
	100	130	210	220
	150	110	160	170
	200	110	170	120
	150	120	210	100
	150	150	160	90
	170	130	150	100
	120	180	190	90
	160	150	120	210
	170	110	230	100
	190	200	190	100
	190	160	160	100
	210	110	200	90

Tabla A.1: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 2 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 2	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	180	160	200	250
	180	210	150	120
	140	150	150	120
	200	180	160	100
	180	150	170	310
	220	110	140	100
	220	140	100	100
	210	130	100	100
	140	150	160	150
	200	160	100	130
	210	170	140	90
	210	120	180	100
	210	150	90	140
	230	170	190	130
	230	180	190	320
	220	150	200	100
	150	170	170	120
	180	160	210	100
	150	110	180	100
	190	140	170	300
	150	160	140	110
	220	150	10	110
	190	150	200	100
	160	150	180	110
	150	160	190	110
	190	190	220	100
	230	160	120	120

Tabla A.1: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 2 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 2	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	160	180	110	110
	160	140	160	120
	200	150	180	100
	180	150	190	120
	170	160	230	100
	210	200	230	290
	160	160	90	210
	170	150	180	110
	170	150	100	90
	150	140	140	100
	140	120	170	100
	150	170	170	280
	100	120	180	100
	170	150	170	120
	200	180	170	100
	180	200	170	310
	180	160	170	290
	120	150	160	100
	140	110	180	150
	170	150	200	130
	170	110	170	100
	140	160	230	110
	230	140	180	90
	200	140	100	270
	140	140	120	100
	160	150	170	230
	170	110	160	100

Tabla A.1: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 2 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 2	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	150	180	200	100
	150	160	160	250
	190	110	100	100
	160	180	100	310
	160	140	140	310
	220	200	110	100
	160	180	120	130
	160	160	140	110
	200	140	90	150
	180	100	170	100
	190	150	90	100
	200	130	220	310
	160	170	240	100

Tabla A.2: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 4 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 4	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
Amplitud mV	120	100	110	110
	100	90	110	100
	100	100	130	100
	90	100	110	120
	100	100	130	120
	110	100	90	90
	100	90	130	200
	100	100	140	90
	100	120	100	100
	110	120	100	90

Tabla A.2: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 4 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 4	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	120	100	180	150
	100	100	110	90
	100	110	110	90
	110	110	120	110
	100	100	100	120
	100	100	90	80
	90	90	100	100
	110	130	90	90
	110	170	130	110
	100	100	90	100
	100	100	90	90
	130	100	100	110
	110	90	90	100
	120	100	100	100
	90	120	100	110
	90	100	120	90
	90	110	90	90
	100	120	100	130
	90	90	90	100
	90	100	90	90
	110	100	100	90
	100	90	100	120
	110	100	90	90
	100	100	100	140
	140	100	100	140
	120	150	110	170
	100	160	110	110

Tabla A.2: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 4 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 4	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	100	110	100	110
	150	100	130	90
	100	100	120	150
	100	100	100	100
	110	110	100	90
	100	110	140	110
	100	100	100	100
	90	100	100	150
	130	90	110	150
	100	110	130	110
	90	100	100	200
	80	120	120	200
	100	110	100	100
	100	100	90	90
	150	100	100	130
	100	100	90	100
	110	100	100	90
	100	130	100	90
	100	110	100	120
	100	110	130	130
	100	120	150	100
	90	100	100	180
	100	90	100	110
	120	100	110	100
	90	160	100	130
	100	100	110	140
	100	100	100	110

Tabla A.2: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 4 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 4	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	100	110	100	100
	90	100	90	100
	80	90	100	130
	100	100	100	110
	100	110	160	90
	90	100	110	100
	100	100	130	100
	100	90	130	100
	90	90	120	100
	90	120	130	150
	120	100	130	150
	100	140	140	100
	100	100	90	150
	100	100	140	100
	90	100	110	100
	90	110	120	180
	80	120	100	90
	120	100	100	120
	90	90	100	130
	80	120	90	110
	120	110	100	100
	90	100	110	150
	100	120	110	100
	90	110	150	90
	120	100	100	100
	100	100	160	100
	100	90	100	90

Tabla A.2: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 4 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 4	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	100	110	130	110
	90	100	100	100
	100	90	120	90
	100	110	90	200
	90	100	130	100
	130	90	150	90
	100	100	120	140
	100	110	100	100
	110	100	140	100
	150	100	140	110

Tabla A.3: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 5 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 5	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
Amplitud mV	90	130	140	100
	100	100	130	160
	90	120	100	100
	90	120	150	150
	100	100	130	150
	110	120	140	110
	90	130	110	120
	110	140	100	190
	100	120	100	140
	110	100	100	200
	120	100	110	220
	100	100	110	100
	110	100	110	120

Tabla A.3: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 5 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 5	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	120	110	140	100
	110	120	130	110
	140	110	130	140
	110	110	100	140
	120	100	110	140
	120	120	150	120
	120	110	160	150
	140	110	100	130
	100	110	160	130
	110	110	130	140
	100	100	130	100
	110	100	140	110
	120	100	120	120
	120	130	120	130
	100	130	120	100
	110	120	100	110
	100	120	130	110
	120	120	160	100
	130	130	110	150
	100	100	150	130
	140	130	100	150
	120	120	100	100
	130	110	130	150
	100	100	160	150
	100	120	170	130
	120	120	150	150
	130	120	130	130

Tabla A.3: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 5 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 5	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	110	120	140	110
	120	110	140	100
	130	100	130	200
	100	110	100	140
	120	130	100	140
	100	110	140	170
	100	110	140	170
	100	130	110	200
	110	110	160	200
	130	120	130	100
	110	100	130	120
	110	130	120	120
	120	100	120	140
	120	120	120	130
	120	130	160	140
	110	100	100	100
	110	100	110	110
	120	120	120	150
	110	120	120	150
	100	100	120	110
	100	120	100	100
	110	120	110	140
	100	100	100	140
	110	110	100	150
	110	100	150	210
	110	110	100	100
	100	100	120	110

Tabla A.3: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 5 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 5	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	100	110	150	170
	120	110	110	160
	110	100	140	100
	110	100	120	140
	120	100	100	150
	100	130	100	130
	120	130	150	100
	110	100	100	100
	120	100	130	100
	120	100	110	140
	120	130	120	150
	120	100	100	150
	120	130	130	160
	130	120	110	170
	140	120	100	130
	140	130	120	180
	110	110	100	120
	110	120	110	100
	130	100	100	160
	120	110	100	150
	110	100	110	100
	100	130	110	150
	100	110	130	140
	120	110	120	100
	120	140	180	160
	120	110	140	160
	110	110	100	120

Tabla A.3: Valores de amplitudes obtenidas en el canal 5 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 5	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	100	110	140	150
	130	100	150	130
	100	100	100	140
	120	100	110	180
	110	100	160	140
	120	130	100	120
	110	120	110	120

Tabla A.4: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 6 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 6	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
Amplitud mV	100	110	100	Sin datos
	150	140	150	Sin datos
	110	100	110	Sin datos
	80	120	170	Sin datos
	140	140	100	Sin datos
	160	140	100	Sin datos
	100	100	90	Sin datos
	100	140	90	Sin datos
	100	100	90	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	110	90	Sin datos
	110	100	100	Sin datos
	100	110	100	Sin datos
	90	100	90	Sin datos
	120	120	130	Sin datos
	100	130	110	Sin datos

Tabla A.4: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 6 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 6	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	140	100	100	Sin datos
	100	100	140	Sin datos
	130	100	90	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	90	120	Sin datos
	90	140	150	Sin datos
	80	100	200	Sin datos
	100	110	100	Sin datos
	120	110	90	Sin datos
	100	110	100	Sin datos
	160	100	120	Sin datos
	100	100	160	Sin datos
	100	100	130	Sin datos
	90	120	140	Sin datos
	100	110	120	Sin datos
	90	100	90	Sin datos
	100	120	100	Sin datos
	90	90	90	Sin datos
	100	100	110	Sin datos
	150	120	90	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	100	160	Sin datos
	100	110	110	Sin datos
	110	120	100	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	130	100	Sin datos
	120	100	120	Sin datos

Tabla A.4: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 6 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 6	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	100	100	100	Sin datos
	110	120	170	Sin datos
	90	110	150	Sin datos
	100	110	100	Sin datos
	100	120	100	Sin datos
	100	120	120	Sin datos
	100	120	120	Sin datos
	100	110	100	Sin datos
	80	100	100	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	110	120	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	120	110	Sin datos
	110	140	100	Sin datos
	110	130	160	Sin datos
	100	120	130	Sin datos
	100	140	100	Sin datos
	100	100	90	Sin datos
	100	110	120	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	90	110	100	Sin datos
	100	150	110	Sin datos
	110	110	110	Sin datos
	100	100	160	Sin datos
	130	100	110	Sin datos
	100	100	110	Sin datos
	100	100	120	Sin datos

Tabla A.4: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 6 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 6	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	80	120	150	Sin datos
	100	100	90	Sin datos
	100	110	110	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	120	100	Sin datos
	120	100	110	Sin datos
	110	110	130	Sin datos
	90	100	100	Sin datos
	100	110	140	Sin datos
	100	90	100	Sin datos
	100	100	110	Sin datos
	100	110	100	Sin datos
	130	110	180	Sin datos
	100	120	130	Sin datos
	110	110	150	Sin datos
	100	130	170	Sin datos
	110	110	100	Sin datos
	110	90	90	Sin datos
	100	100	110	Sin datos
	100	100	140	Sin datos
	100	100	170	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	110	120	120	Sin datos
	100	100	100	Sin datos
	100	90	100	Sin datos
	90	100	110	Sin datos
	100	100	100	Sin datos

Tabla A.4: Valores de las amplitudes obtenidas en el canal 6 utilizando 4 voltajes de operación.

CANAL 6	V=-1560 v	V=-1660 v	V=-1760 v	V=-1860 v
	110	100	90	Sin datos
	100	100	170	Sin datos
	120	100	100	Sin datos
	130	120	90	Sin datos



León, Guanajuato a 6 de junio del 2023

Dr. David Delepine
División de Ciencias e Ingenierías
Director

Por medio de la presente le informo que considero que el documento de tesis que presenta José Francisco Ambriz Gutiérrez, con título *Planeación, diseño, construcción y caracterización de un sistema de detección y trazado de rayos cósmicos* reúne todos los requisitos para proceder a su defensa en examen para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Física, por lo que como sinodal doy mi aval para continuar con este proceso.

Agradeciendo su atención quedo a sus órdenes para cualquier aclaración

Una firma manuscrita en tinta azul que dice "Alejandro Gil-Villegas Montiel".

Dr. Alejandro Gil-Villegas Montiel

Departamento de Ingeniería Física
División de Ciencias e Ingenierías, Campus León
Loma del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León, Gto, México, C.P. 37150
Tel. 01 (477) 788-5100 Ext. 8427
gil@fisica.ugto.mx



León, Guanajuato, 14 de junio de 2023

Dr. David Yves Ghislain Delepine
Director División de Ciencias e Ingenierías
Campus León

PRESENTE:

Por medio de este documento hago constar que una vez revisado el trabajo de Tesis titulado: **“Planeación, diseño, construcción y caracterización de un sistema de detección y trazado de rayos cósmicos”**, que presenta el C. José Francisco Ambriz Gutiérrez para obtener el título de Ingeniero Físico, lo encuentro satisfactorio y considero que cumple con los criterios de originalidad y calidad que exige nuestra institución, por lo que avalo se realice la defensa pública de esta tesis, para obtener el grado mencionado.

Atentamente
“La verdad os hará libres”

Una firma manuscrita en azul que parece ser la del Dr. Carlos Villaseñor Mora.

Dr. Carlos Villaseñor Mora
Profesor – Investigador Titular A



León, Guanajuato, 27 de junio de 2023

Dr. David Delepine
Director de la División de Ciencias e Ingenierías
Campus León, Universidad de Guanajuato
PRESENTE

Estimado Dr. Delepine:

Por este medio, me permito informarle que he leído la tesis titulada "**Planeación, diseño, construcción y caracterización de un sistema de detección y trazado de rayos cósmicos**" que realizó José Francisco Ambriz Gutiérrez como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Física.

Considero que el trabajo realizado por Francisco es muy completo y que aporta conocimiento de relevancia para el futuro experimental de la física de altas energías. Considero que su trabajo reúne los requisitos necesarios de calidad e interés académico para que sea defendida en un examen profesional, razón por la cual extiendo mi aval para que así se proceda.

Sin más que agregar, agradezco su atención y aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"LA VERDAD OS HARÁ LIBRES"

Dr. Juan Barranco Monarca
División de Ciencias e Ingenierías UG