



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
LICENCIATURA EN FÍSICA APLICADA

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA RPC DE
DOS GAPS CON MÓDULOS COMERCIALES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

PRESENTA:

ALEJANDRA BONILLA SANDOVAL

ASESORADO POR:

DR. GUILLERMO TEJEDA MUÑOZ

PUEBLA, MÉXICO

OCTUBRE, 2021

A mi familia, por dormirse temprano
para que yo pueda estudiar hasta la madrugada.

No estoy para contarlo ni ustedes para saberlo, pero
agradezco a todas las personas que durante mi tiempo
de estudiante me ayudaron a terminar la licenciatura.

De alguna manera, todos contribuyen a este final.

POPO.

RESUMEN

Un detector sirve para percibir la presencia de algo que es de percepción nula o casi nula. La física nos provee de diversos tipos de detectores con diferentes bases de funcionamiento. Existen los detectores que funcionan en base a ionización gaseosa como los son las cámaras de ionización. Este tipo de detectores es el que nos interesa y hablaremos de ellos en el presente trabajo. Para ser más específicos, hablaremos de las Cámaras de Placas Resistivas o RPC (*Resistive Plate Chamber*). Usados en experimentos de altas energías y astropartículas son detectores de gas conformados por placas paralelas usando un alto volumen de resistividad como el vidrio o baquelita. Es decir, trabaja con órdenes de resistividad entre $10^7\Omega$ y $10^{12}\Omega$. Tienen alta eficiencia y una elevada resolución temporal. Sin embargo, no solo interesan por su exactitud en la captura de datos, sino que también su costo de producción es, hasta cierto punto, bajo.

Presentamos la construcción y caracterización de una RPC de dos gaps, construida con un vidrio de 2 milímetro de espesor. En principio se sabe que, si se disminuye el espacio del gap individual y se aumenta el número de gaps, la resolución del tiempo se puede mejorar. La RPC aquí expuesta, consta de dos gaps de 1 milímetro de espesor, que resulta ser la mitad del espesor del vidrio, Los detalles son descritos en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	I
Introducción	II
Capítulo 1: Radiación y su interacción con la materia	
1.1 Radiaciones ionizantes	1
1.1.1 Radiación alfa	2
1.1.2 Radiación beta	2
1.1.3 Radiación gamma	2
1.1.4 Radiación de neutrones	3
1.2 Fuentes de radiación artificiales	3
1.3 Fuentes de radiación naturales	4
1.3.1 Radiación cósmica	4
1.3.2 Radiación ambiental	5
1.4 Interacción	
1.4.1 Mecanismos de interacción	6
I. Ionización.	7
II. Efecto fotoeléctrico	8

III. Efecto Compton.....	9
IV. Producción de pares	10
1.5 Detección.....	11

[Capítulo 2: Detectores de partículas](#)

2.1 Propiedades generales de los detectores	13
2.1.1 Eficiencia.....	13
2.1.2 Resolución de energía	14
2.1.3 Tiempo muerto	15
2.1.4 Modos de operación.....	16
2.2 Tipos de detectores de partículas.....	16
2.2.1 Detectores de semiconductor	16
2.2.2 Detectores de centelleo.....	17
2.2.3 Detectores de ionización gaseosa.....	18
I. Cámaras de ionización	18
II. Contador proporcional.....	19
III. Contador Geiger-Müller.....	20
IV. Cámaras de Placas Resistivas.....	21
2.3 Cámaras de placas resistivas.....	21
2.3.1 Materiales principales de construcción	22
2.3.2 Modos de operación	24
2.3.3 Corriente y carga inducida.....	26
2.3.4 Mezcla de gases.....	30

2.3.5 Eficiencia.....31

Capítulo 3: Fabricación y descripción técnica de la RPC

3.1 Diseño y construcción de la RPC.....32
3.2 Diseño experimental.....38
3.3 Digitalizador CAEN 742.....40
3.4 Generación del Trigger.....42
3.5 Sistema de distribución de gases.....43

Capítulo 4: Resultados de la caracterización

4.1 Preparación del detector.....45
4.2 Resistividad.....46
4.3 Rate Capability.....47
4.4 Eficiencia.....48
4.5 Resolución temporal.....50

Conclusiones.....56

Bibliografía.....58

INTRODUCCIÓN

Cuando se hablan de las Cámaras de Placas Resistivas se toma como la primera referencia el trabajo de Rinaldo Santonico y Roberto Cardarelli del Instituto de Física de la Universidad de Roma y del Instituto Nacional de Física Nuclear en Sezione, en Roma, respectivamente, en su artículo de enero de 1981: <<*Development of Resistive Plate Counter*>> (Desarrollo de un Contador de Placas Resistivas) [1]. Sin embargo, sus antecedentes datan de entre 1948 y 1949 con Kauffel cuando publica su artículo llamado <<*Parallel-Plate Counters*>>, del cual podemos decir que este es fue el primer contador experimental. Casi al mismo tiempo, Pidd y Madanski publican <<*Some properties of the Parallel Plate Spark Counter I*>>. En 1978 de G. V. Fedotovitch, I. N. Pestov y otros presentan su trabajo titulado <<*Spark Counter with a localized discharge as a new particle detector*>> (Contador de chispas con descarga localizada como nuevo detector de partículas) [2], en donde describen el contador de chispas como dos placas paralelas de vidrio, una de vidrio semiconductor y la otra de vidrio común, con dimensiones de 30 cm X 30 cm separadas entre sí unos milímetros. Las placas son sometidas a un alto voltaje haciendo fluir gas en el espacio entre ellas, el gas es ionizado cuando una partícula atraviesa el área de las placas liberando electrones que son acelerados hacia el ánodo dentro del espacio por efecto del fuerte campo eléctrico. Con una resolución temporal de ~1ns reportaron su contador con una alta eficiencia. Una de las diferencias más notables entre el

detector ruso y el italiano es el uso del material empleado en los electrodos, el primero utilizaba vidrio y el segundo baquelita. El uso de baquelita en la construcción del contador de chispas supuso un mayor número de aplicaciones.

Actualmente, las cámaras de placas resistivas (RPC's) son construidas ya sea de vidrio o baquelita. Con un revestimiento de pintura de alta resistividad son sometidas a un alto voltaje (HV); así cuando una partícula cargada atraviesa el área activa del detector deja carga libre en el gas, esta carga libre se multiplica y acelera en dirección al ánodo gracias a un campo eléctrico adecuado, este movimiento de carga induce una señal leída gracias a los electrodos de lectura. Por otro lado, desde la presentación de las RPC en 1981, se ha mejorado la resolución del tiempo obteniendo el registro de descargas en picosegundos en lugar de nanosegundos. En el trabajo de esta tesis presentamos la construcción y caracterización de una cámara de placa resistivas de dos gaps, construida con vidrio de 2 mm de espesor.

CAPÍTULO 1

RADIACIÓN Y SU INTERACCIÓN CON LA MATERIA

Radiación es la propagación de energía por ondas electromagnéticas o partículas a través del espacio. Las ondas electromagnéticas se manifiestan de diferentes maneras (ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma) dependiendo de la cantidad de energía que estén transportando. Desde un punto de vista más general, se clasifica las ondas o radiaciones electromagnéticas en *radiación no ionizante* y *radiación ionizante*.

Recordemos que la materia está compuesta por átomos. Los átomos se componen de un núcleo conformado de neutrones y protones, y de electrones orbitando alrededor del núcleo. Si la cantidad de electrones y protones es la misma tenemos un átomo neutro, por el contrario, tendremos un exceso de carga en el átomo; al átomo con exceso de carga se le llama ion.

1.1 RADIACIONES IONIZANTES

Las radiaciones ionizantes son aquellas radiaciones que cuentan con energía suficiente para ionizar la materia; es un fenómeno físico por el cual algunos elementos químicos o cuerpos físicos tienen la propiedad de impresionar placas

fotográficas, producir fluorescencia o fosforescencia, ionizar gases, entre otros. Tienen energías superiores a 10 KeV, y son fenómenos producidos gracias a la interacción de la radiación con la materia, ya sea que la materia absorba la radiación o la disperse, aunque en algunos casos la radiación puede atravesar la materia sin producir algún tipo de interacción.

Estas interacciones dependen de la carga eléctrica y de la masa de la partícula que incide en el material. La carga de la partícula se pierde de forma continua al atravesar el material debido a las muchas interacciones; también puede perder toda su energía en una sola interacción.

1.1.1 RADIACIÓN ALFA

Este tipo de radiación tienen bajo poder de penetración, pero una gran intensidad energética por lo que puede generar un gran daño en una región focalizada. Las partículas alfa no recorren más de unos centímetros en el aire siguiendo una trayectoria recta [3] con un frenado gradual, por esa razón se dice que la radiación alfa es una radiación de corto alcance.

1.1.2 RADIACIÓN BETA

Al contrario de las partículas alfa, la trayectoria de las partículas beta es quebrada, aunque el frenado sigue siendo gradual. Las partículas beta son electrones y positrones que salen disparados a gran velocidad después de un suceso radioactivo. Tienen menor masa, por lo tanto, menor energía y menor poder de ionización. El alcance de la radiación beta es de uno metros en el aire o algunos centímetros en el agua, es decir, tiene un alcance medio.

1.1.3 RADIACIÓN GAMMA

La radiación gamma es producto de fotones de origen nuclear con alta energía. Su poder de ionización es bajo, pero la capacidad de penetración es alta. En cada evento el fotón desaparece y la ionización originada es debida a electrones secundarios. Para detener las partículas gamma es preciso utilizar

materiales muy densos como el plomo y el hormigón. Por su alta energía se dice que la radiación gamma es de gran alcance.

1.1.4 RADIACIÓN DE NEUTRONES

Los responsables de esta radiación son neutrones libres que son resultado de reacciones nucleares, fisión y/o fusión nuclear. La trayectoria de los neutrones suele ser quebrada y la ionización es producto de iones secundarios que surgieron al contacto con moléculas e isótopos estables. Es una radiación larga permanencia y gran alcance.

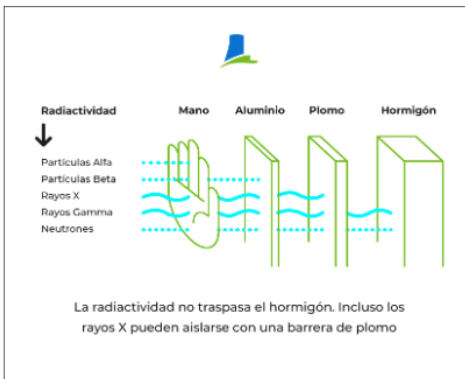


FIGURA 1. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.

1.2 FUENTES DE RADIACIÓN ARTIFICIALES

El hombre ha comprendido la naturaleza y comportamiento de las radiaciones ionizantes pudiendo utilizarlas a su favor, desde la industria hasta en medicina y alimentos. Haremos una mención rápida de las diferentes fuentes de radiación artificiales y en donde las podemos encontrar:

- Aceleradores de partículas utilizados en la investigación en física nuclear y de partículas.
- Aceleradores de partículas utilizados en la investigación en física de materiales.
- Reactores de producción de energía.

- Ensayos con armamento militar nuclear.
- Tratamientos médicos y terapias con rayos X, radioisótopos.

De todas las fuentes de radiación mencionadas, los aceleradores de partículas utilizados en investigación representan el menor porcentaje en fuentes de radiación artificiales.

1.3 FUENTES DE RADIACIÓN NATURALES

La naturaleza tiene sus propias fuentes de radiación. Son dos fuentes principales que encontramos y describiremos a continuación.

1.3.1 RADIACIÓN CÓSMICA

Entendemos por radiación cósmica cualquier radiación y partícula que procede del espacio exterior, ya sea del sol, cuerpos celestes de nuestra galaxia o de otra galaxia.

Cuando un rayo cósmico entra en contacto con la atmósfera terrestre, se dispersa en presencia de otros núcleos atmosféricos desencadenando la creación de nuevas partículas, producto de una reacción nuclear. A medida que la partícula primaria colisiona con un núcleo atmosférico se producirá como resultado, piones, bariones y kaones cargados. Este efecto causado por la colisión de protones o núcleos con altos niveles de energía se conoce como *cascada atmosférica*. Las cascadas atmosféricas tienen lugar, en promedio, a 20 km sobre la superficie de la tierra.

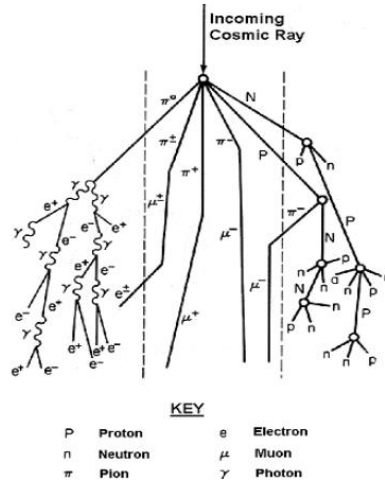


FIGURA 2. CASCADA ATMOSFÉRICA, PRODUCTO DE UN RAYO CÓSMICO.

El núcleo incidente o restos resultantes viajan a gran velocidad en dirección del suelo hasta que se tiene otras colisiones o hasta que llegan a la superficie terrestre. Las partículas más populares originadas en estas interacciones son los piones. Los piones neutros, π^0 , tienen una desintegración casi instantánea, en cambio los piones cargados, π^+ π^- pueden colisionar con otros núcleos atmosféricos produciendo nuevas partículas o su desintegración a un muón y un neutrino. Los muones tienen un periodo de vida promedio de 2 microsegundos, desintegrándose en un electrón y dos neutrinos, pero debido a los efectos relativistas sobre el tiempo, es posible que los muones lleguen íntegros al nivel del suelo. Por eso, una parte importante de muones alcanzan la superficie terrestre y aún son capaces de alcanzar cientos de metros debajo de la tierra; por otro lado, los neutrones pueden atravesar todo el diámetro de la Tierra.

El estudio de rayos cósmicos es, hoy, un campo de investigación en busca de muchas respuestas y cuenta con grandes observatorios y experimentos alrededor del mundo.

1.3.2 RADIACIÓN AMBIENTAL

La radiación ambiental o terrestre son las fuentes de radiación que encontramos en la vegetación, el suelo y el agua. Son los radionucleidos los

responsables de esta radiación y contribuyen a la dosis anual de un individuo, aunque no en gran cantidad, por lo que no representa un peligro a menos que se encuentre en lugares con concentraciones elevadas de estos isótopos.

Se dice que son elementos radioactivos que se formaron al momento de la formación de la Tierra, con vidas medias largas, lo suficiente como para que todavía se encuentren en la Tierra, El uranio, potasio-40, plutonio, bismuto y torio son ejemplos de estos radionucleidos primordiales.

Existen también los radionucleidos cosmogénicos, que se producen por la interacción con los rayos cósmicos, como el uranio y el torio, que son ingeridos en alimentos y agua, o como el radón, que se inhala. Este último es un gas noble carente de olor, color y sabor, representa la fuente natural de radiación más grande que contribuye a la exposición de los individuos, aun así, la dosis de radiación anual de radón es en promedio 2 mSv/año, la cual varía de un lugar a otro. Los isótopos ^{222}Rn y ^{220}Rn son los que tienen mayor representación en la superficie terrestre, son muy importantes desde el punto de vista de protección radiológica y se investigan los efectos en la salud por la incidencia de cáncer producida por una exposición prolongada a estos gases.

1.4 MECANISMOS DE INTERACCIÓN

Las múltiples interacciones existentes entre partículas ionizantes y materia tienen su origen en las colisiones elásticas o inelásticas con núcleos o electrones atómicos.

Si las colisiones son elásticas no hay pérdida de energía cinética durante ni después de la colisión; por el contrario, en las colisiones inelásticas se pierde parte de la energía cinética convirtiéndose en alguna otra forma de energía.

Las colisiones son importantes porque gracias a ellas se producen fenómenos como ionización y excitación, o radiación y absorción. Fenómenos que dan como resultados los diferentes mecanismos de interacción.

La materia y la radiación no siempre interactúan de la misma manera, y esto se debe a que la energía de radiación no siempre es la misma, ni las partículas incidentes, las trayectorias, la velocidad con que incide sobre la materia, y otros muchos factores más que determinan la manera en que sucederá la interacción.

Uno de estos mecanismos es la interacción Coulombiana que describe los modos de excitación e ionización al momento que se da la interacción entre radiación electromagnética con la materia y estas son gobernadas por las fuerzas de Coulomb.

Cuando una partícula penetra el medio absorbente comienza a haber actividad entre la partícula y los electrones del medio. Según sea la proximidad del encuentro entre éstos es el impulso que siente el electrón debido a la fuerza de Coulomb, si el impulso es suficiente el electrón pasará de su estado fundamental a un nivel de energía superior, este proceso es conocido como excitación. Sí, por el contrario, el electrón es removido del átomo, tenemos ionización.

I. IONIZACIÓN

Ionización es el proceso que pasa un átomo o molécula en donde gana o pierde electrones para formar iones cargados, este proceso puede ser resultado de colisiones con partículas energéticas, otros átomos, moléculas, iones, o mediante la interacción con radiación electromagnética, y deja iones y electrones libres que pueden ser colectados por medio de un campo eléctrico. La radiación ionizante, en general, es cualquier radiación que transporta energía suficiente para eliminar electrones de átomos o moléculas, ionizándolos. La energía necesaria para eliminar un electrón de un átomo neutro es conocida como *potencial de ionización*. Para cada elemento químico el potencial de ionización es diferente.

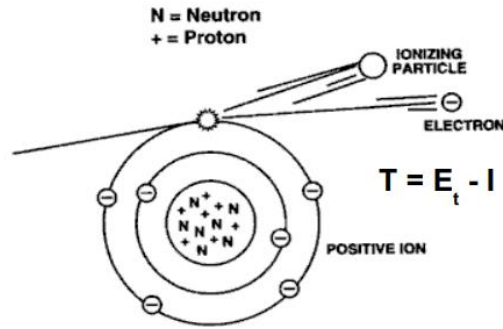


FIGURA 3. COLISIÓN DE UNA PARTÍCULA CON UN ÁTOMO ORIGINANDO IONIZACIÓN.

Cuando la partícula incidente tiene, por lo menos, la energía del potencial de ionización para expulsar un electrón del átomo se dice que ocurrió una ionización primaria. Si el electrón expulsado lleva energía suficiente puede ocasionar una ionización secundaria del mismo modo que sucede en la ionización primaria, y el proceso puede repetirse las veces que sea, siempre y cuando el electrón liberado supere el potencial de ionización.

II. ABSORCIÓN FOTOELÉCTRICA

También llamado efecto fotoeléctrico, es producido por la interacción entre un fotón y un átomo, en el cual el fotón desaparece, debido a que el electrón absorbe la energía total del fotón y en su lugar un fotoelectrón es emitido. Los valores de las energías que producen este efecto, son menores a los 100 keV. Para fotones de suficiente energía, el fotoelectrón más probable proviene de la órbita más cercana al núcleo del átomo, la capa K, dejando un espacio libre que será ocupado por otro electrón emitiendo rayos X, y en algunos casos, el rayo X emitido puede arrancar un electrón de las capas menos ligadas emitiendo un electrón Auger. El átomo que resulta después de efecto fotoeléctrico es un ion positivo.

La energía que emiten lo fotoelectrones es:

$$E_f = E_\gamma - E_b$$

donde $E_\gamma = h\nu$ es la energía del fotón incidente y E_b la energía de la unión entre el electrón y el átomo.

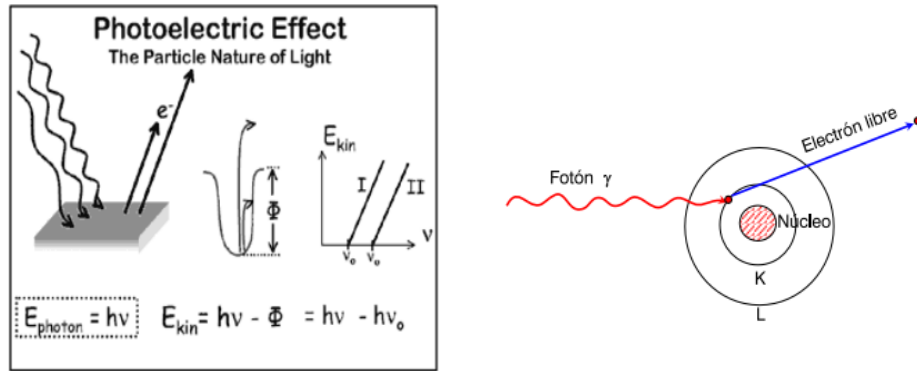


FIGURA 4. REPRESENTACIONES GRÁFICAS DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Se le atribuye el descubrimiento del efecto fotoeléctrico a Heinrich Hertz, cuando en el año 1887 trataba de probar la naturaleza ondulatoria de la teoría de radiación electromagnética propuesta por Maxwell. En su lugar, sus experimentos mostraron la naturaleza corpuscular de la luz. Y en 1921, a Albert Einstein le fue concedido en premio Nobel de Física por su trabajo realizado sobre el efecto fotoeléctrico.

Se puede entender el efecto fotoeléctrico de manera sencilla con la siguiente explicación: si se ilumina una superficie metálica con un haz de luz con una frecuencia apropiada se emiten electrones en la superficie. Esta emisión de electrones desde la superficie metálica por acto de la luz es lo que se conoce como *efecto fotoeléctrico*.

III. EFECTO COMPTON

Llamado así en honor a Arthur Holly Compton, es la interacción entre un fotón y un electrón atómico, el fotón es dispersado transfiriendo parte de su energía al electrón. La energía que une al electrón con el átomo es mucho menor que la energía del fotón incidente, considerándose un electrón libre, al chocar el fotón con el electrón, éste es desviado de su trayectoria inicial en un ángulo ϕ con una energía E_e , y el fotón sufre una dispersión en dirección del ángulo θ y su energía

es disminuida a $h\nu'$. Como $E_b \ll E_\gamma$, podemos despreciarla y por el principio de conservación de la energía podemos escribir:

$$h\nu = h\nu' + E_e$$

La energía puede tomar valores desde cero hasta una fracción elevada de la energía del fotón, ahora bien, por la conservación de la energía y la cantidad de movimiento en condiciones relativistas, el valor de la energía del fotón dispersado se calcula de la siguiente manera:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

donde $\alpha = h\nu/m_0c^2$, y m_0 es la masa del electrón cuando se encuentra en reposo.

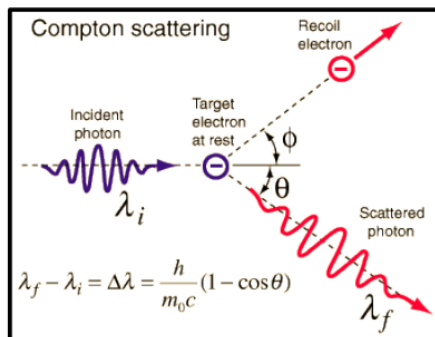


FIGURA 5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL EFECTO COMPTON.

Del mismo modo que el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton deja al final un átomo residual ionizado, con la diferencia que la capa libre que deja la colisión entre el fotón y el electrón es más externa, justo en donde encontramos los electrones de valencia, así que la energía que se produce de la emisión de radiación electromagnética por efecto de la desexcitación es baja.

IV. PRODUCCIÓN DE PARES

Con energía superiores a 1.02 MeV, un fotón que excede el doble de la masa de un electrón, en el campo del núcleo desaparece dejando en su lugar un par positrón-electrón y el exceso de energía del fotón se transforma en energía cinética. Por el principio de conservación de la energía expresamos,

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_-$$

en donde E_+ es la energía del positrón y E_- es la energía del electrón. Si la energía del fotón es menor a 1.02 MeV la creación de pares no puede ser, así que este valor se convierte en un umbral energético para el proceso.

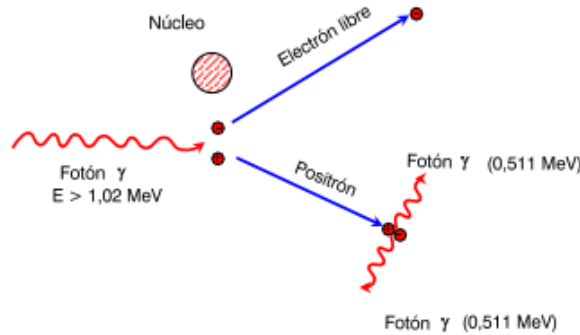


FIGURA 6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE PARES.

Los protones que resultan de este proceso se aniquilan al combinarse con electrones del medio de interacción, esta es la razón que en la interacción de radiación gamma de alta energía ($E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$) venga acompañada de radiación de aniquilación.

1.5 DETECCIÓN

La radiación es imposible medirla por medio de nuestros sentidos puesto que son invisibles, inodoras, silenciosas, insípidas e imperceptibles para nuestro tacto, razón por la cual los métodos utilizados para su detección dependen de aparatos diseñados por el humano, ya que los efectos producidos por la radiación si los podemos percibir, como emisiones de luz, cambios de temperatura o efectos químicos, que indican presencia de radiación.

La detección de la radiación ionizante se realiza midiendo la carga producida por la deposición de energía en un determinado material al atravesarlo. La probabilidad de medición o detección está relacionada con la interacción electromagnética y su alcance.

Aunque los efectos que se producen al estar en contacto el material con la radiación son de cortísima duración, nanosegundos si el material es un gas y picosegundos si es un sólido, la aparición de una carga eléctrica dentro del volumen del detector es medible e interpretada por medio de una señal eléctrica. En un modelo simplificado se asume que se induce una carga Q al tiempo $t=0$ cuando una sola partícula o cuanto de radiación atraviesa el volumen activo del detector. Aplicando un campo eléctrico se colectan las cargas negativas y positivas, producto de la radiación. El tiempo de recolección de carga cambia, según el detector y la distancia media que tiene que recorrer la carga antes de llegar a los electrodos de recolección.

Dejando a un lado el modelo simplificado, sabemos que dichas interacciones son producto, no de una, sino de muchas partículas atravesando el detector. Si la tasa de incidencia es baja tendremos pulsos bien definidos y veremos algo como sigue:

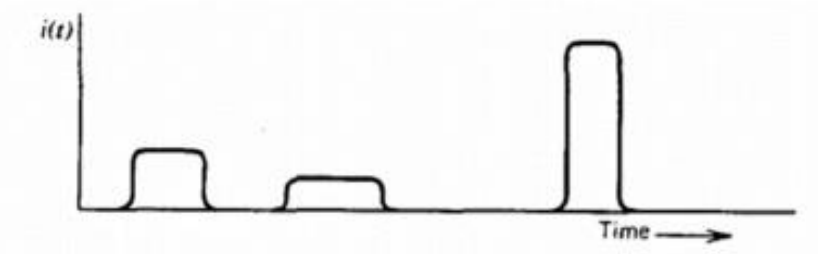


FIGURA 7. PULSOS DISTINGUIBLES ORIGINADOS POR LA CORRIENTE DENTRO DEL DETECTOR.

La amplitud y ancho de pulso depende de la partícula incidente, donde el ancho del pulso representa el tiempo de respuesta del detector.

Los medios de detección más comunes son: detectores gaseosos (cámaras de ionización, contador Geiger-Müller), detectores de estado sólido (Silicio) y detectores de centelleo (plástico centelleador).

CAPÍTULO 2

DETECTORES DE PARTÍCULAS

Un detector es un dispositivo capaz de percibir y recolectar información de cierto fenómeno físico, como la intensidad de un campo eléctrico, el aumento de energía cinética o la presencia de una partícula en un medio. Los detectores funcionan a partir de la alteración de una observable física del sistema en el que se encuentra operando. Las características generales de los detectores son las siguientes: eficiencia, resolución, tiempo muerto y modo de operación.

2.1 PROPIEDADES GENERALES DE LOS DETECTORES

2.1.1 EFICIENCIA

La eficiencia o rendimiento es la razón entre la energía que se obtiene, es decir, el trabajo realizado, y la energía que se invierte o suministra. En el caso de los detectores de radiación, la interacción con su volumen activo produce un pulso, por lo que la eficiencia del detector queda establecida por la relación del número de pulsos que estos efectúan.

Por un lado, tenemos la eficiencia absoluta que se calcula con el número de pulsos entre el número de cuentas o eventos emitidos por la fuente:

$$\text{Eficiencia Absoluta} = \frac{\text{No. de pulsos}}{\text{No. de cuentas emitidas}}$$

este cálculo depende de la geometría del detector y de la probabilidad de las interacciones dentro del detector. Por otro lado, tenemos la eficiencia intrínseca, la cual se calcula como el número de pulsos entre el número de cuentas o eventos incidentes:

$$Eficiencia\ Intrínseca = \frac{No.\ de\ pulsos}{No.\ de\ cuentas\ incidentes}$$

La eficiencia intrínseca depende de la sección transversal del detector y su interacción con la radiación incidente, por lo que el tipo de radiación y energía, y el tipo de material que constituye el detector no son despreciables para el cálculo de esta eficiencia.

Como ya mencionamos, la eficiencia absoluta depende de la geometría y de los eventos incidentes en el detector, entonces, podemos determinar la eficiencia absoluta o total por la siguiente expresión:

$$Eficiencia\ total \simeq (Eficiencia\ intrínserca)(Eficiencia\ geométrica)$$

La eficiencia geométrica depende de la razón entre la cantidad de radiación emitida por la fuente y la cantidad de radiación interceptada por el detector. Como es evidente, la cantidad de radiación interceptada por el detector depende de la geometría misma del detector.

Es posible calcular la eficiencia total de los pulsos generados en el detector o la eficiencia de un solo pulso correspondiente a un pico de energía, eficiencia de pico.

2.1.2 RESOLUCIÓN EN ENERGÍA

Esta es la respuesta del detector a una fuente energética de radiación; la capacidad de distinguir dos valores de energía cercanos entre sí provenientes de una fuente monoenergética de radiación. Al incidir un haz de radiación de una sola energía, sobre el detector observamos el espectro resultante de la energía.

Lo que esperamos ver es un pico de energía parecido a la Delta de Dirac, un pico de energía en una región bien delimitada que se mantiene constante para un valor específico de energía. Sabemos que eso es solo un ideal, por lo que, en realidad obtenemos un pico de energía con distribución Gaussiana en donde dados los cambios en el número de ionizaciones y excitaciones, el ancho del pico puede cambiar. Cuanto mayor es el ancho del pulso menor es la resolución energética.

Se desea que la carga producida sea proporcional a la energía de la partícula, y esta a su vez, proporcional a la señal H del detector. Ahora bien, si ΔH es el ancho del pico de la señal producida por el detector, la resolución relativa será:

$$R = \frac{\Delta H}{H}$$

Los factores que afectan la resolución de modo directo son las variaciones en las características de operación durante la medida, ruido en el detector y en el sistema instrumental, y variaciones estadísticas asociadas a la naturaleza discreta de las mediciones, las cuales no se pueden eliminar.

2.1.3 TIEMPO MUERTO

También llamado tiempo de respuesta, es el tiempo mínimo que hay entre dos pulsos. Los eventos que sucedan en este intervalo de tiempo se pierden. Existen dos tipos de modelos para determinar el tiempo muerto.

El modelo paralizante, en donde los eventos que ocurren durante el tiempo muerto aumentan este intervalo de tiempo. El modelo no paralizante, donde los eventos ocurridos entre el tiempo que hay entre dos pulsos no afecta la duración del tiempo muerto, por esta razón, también se le conoce como tiempo muerto no extendible. El tiempo muerto limita la tasa de conteo a la que opera el detector.

2.1.4 MODO DE OPERACIÓN

Hay dos clasificaciones en los modos de operación de los detectores de radiación. El primero es el modo de corriente; una corriente continua producida en el detector es medida y calculada su media. En este modo de operación la información individual se pierde. Detectores en dosimetría y control de reactores son ejemplos de este modo de operación.

El otro modo de operación es el modo de pulso, por cada pulso de corriente se mide una señal de salida, podemos extraer información útil de cada pulso, por ejemplo, energía. Los detectores en física nuclear y espectroscopía son detectores que operan en modo de pulso.

2.2 TIPOS DE DETECTORES DE PARTÍCULAS

En física de partículas hay diferentes tipos de detectores para conocer la interacción que hay entre la radiación y la materia. En otras palabras, para cada detector hay una forma de interacción específica radiación-materia. A continuación, expondremos algunos tipos de detectores.

2.2.1 DETECTORES DE SEMICONDUCTOR

Los semiconductores son sólidos cristalinos en donde su estructura interna es mantenida por átomos unidos por enlaces covalentes. Son materiales sólidos con alta densidad tal que, al atravesar una partícula ionizante por el material, puede perder toda su energía en un corto tiempo, haciendo su recorrido muy corto, por lo que la eficiencia de detección es buena por unidad de volumen efectivo, lo que permite reducir el volumen activo del detector. Generalmente se emplea germanio o silicio para su construcción. Es de respuesta rápida y lineal, en cuanto a la geometría, es versátil, aunque es muy susceptible a la degradación. También cuentan con una alta resolución para determinar las trazas de las partículas.

Su funcionamiento es similar al funcionamiento de las cámaras de ionización, pero en lugar de producir pares ion-electrón, produce pares electrón hueco, estos pares fluyen por el semiconductor produciendo una señal; o, dicho de otra manera, cuando se producen los efectos iónicos de radiación el cristal se ioniza absorbiendo la radiación y produciendo la señal eléctrica.

2.2.2 DETECTORES DE CENTELLO

Hay materiales que tienen la propiedad de emitir luz visible cuando sus átomos son excitados tras el paso de un haz de radiación ionizante, así esta luz produce una señal visible. La radiación pierde energía cuando atraviesa un centelleador produciendo transiciones electrónicas a estados excitados que al momento de decaer emiten fotones, si la emisión es rápida (10^{-8} s) el efecto producido es fluorescencia, si es más lenta tenemos fosforescencia. Fue Wilhelm Roentgen, en 1895 cuando experimentando con rayos catódicos observó por primera vez el efecto de luminiscencia en un papel pintado con una sustancia fluorescente sensible a la luz

Estos detectores constan de dos elementos: material luminiscente o centelleador y un tubo fotomultiplicador, y podemos encontrar detectores sólidos y líquidos. El material centelleador debe ser de alto rendimiento y transparente a la luz visible, debe tener una relación lineal entre la energía depositada y la cantidad de luz emitida, además, para que sea un buen material centelleador debe tener también un corto tiempo de desaparición de la luminiscencia, es decir, que sea capaz de generar pulsos luminosos con la mayor rapidez posible.

Hay centelleadores inorgánicos como cristales de haluro alcalinos, como el INa. Son lentos, pero emiten mucha luz y su respuesta es lineal. Y hay centelleadores orgánicos en forma líquida o polimerizado en plásticos, son mucho más rápidos, pero emiten menos luz.

En general tienen un tiempo de respuesta inferior al de los detectores de ionización gaseosa, además de tener baja eficiencia y una pobre resolución.

2.2.3 DETECTORES DE IONIZACIÓN GASEOSA

Los primeros detectores de gas desarrollados constaban de una cámara cilíndrica con un filamento central, la cual contenía gas a una presión determinada. Entre la pared del cilindro y el filamento se aplica un potencial ionizando el gas al momento que una partícula cargada atraviesa la cámara produciendo iones y electrones que se agrupan en el filamento (ánodo +), colectando una carga Q que produce un pulso que es procesado electrónicamente. El pulso está dado en función del voltaje V aplicado.

Podemos numerar algunos tipos de detectores gaseosos, cada uno operando en ciertos rangos de voltajes, y cada uno con su función especial.

I. CÁMARA DE IONIZACIÓN

Cuando el voltaje es cero ($V=0$) se produce una recombinación iónica, el campo eléctrico es poco eficiente en la recolección. A medida que la recombinación disminuye el voltaje aumenta, cuando llegamos a $V \approx 300$ entramos en la zona en la que operan las cámaras de ionización que es la zona de saturación.

Empleadas en dosimetría, son operadas en modo corriente con aire seco o gases pesados como el Argón a presión normal. Fundamentalmente hay dos tipos de cámaras: planas y cilíndricas, más su funcionamiento no depende de la geometría propia de la cámara. Por su tipo de operación también las podemos dividir en dos grupos: cámaras de corriente (detectores) y cámaras de impulso (espectrómetros), las cuales necesitan de un amplificador para poderlas operar.

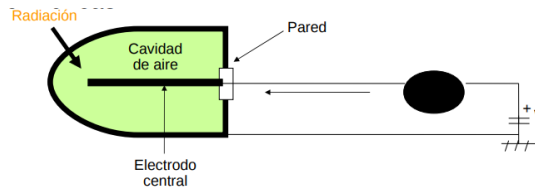


FIGURA 8. CÁMARA DE IONIZACIÓN.

II. CONTADOR PROPORCIONAL

Cuando operamos con un voltaje en un intervalo entre $V \approx 600-700V$ se observa el fenómeno de multiplicación de carga; los electrones liberados en la ionización adquieren tanta energía en su trayecto al ánodo que producen nuevas ionizaciones aumentando la carga Q . La altura de los pulsos depende de las características de la ionización inicial. Con estos contadores existe la posibilidad de distinguir entre partículas de diferente energías y poderes de ionización.

Si la partícula incidente deja toda su energía puede trabajar como un espectrómetro, por lo general incidiendo rayos X y rayos gamma de baja actividad.

III. CONTADOR GEIGER-MÜLLER

Trabaja con voltajes por encima de los 700 V ($V \approx 700-800V$). Todos los impulsos son independientes de la ionización, son altos y alcanzan la misma amplitud, aunque se pierde la información de la energía depositada. La señal obtenida no necesita amplificación, al contrario del contador proporcional funcionando como espectrómetro y de la cámara de impulsos, por lo que son baratos y adecuados para medir niveles bajos de radicación gamma y partículas β .

Solo funciona como contador, no es apto para tener información de las partículas. Además, tienen un tiempo muerto elevado, eso significa que son lentos y no recomendados para altas tasas de pulsos.

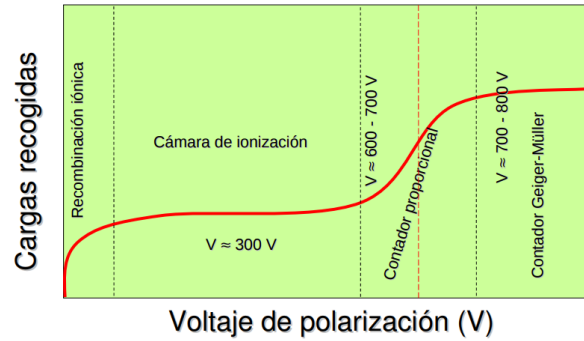


FIGURA 9. GRÁFICO DE LOS DETECTORES DE IONIZACIÓN Y SUS RANGOS DE VOLTAJE DE OPERACIÓN.

IV. CÁMARAS DE PLACAS RESISTIVAS

Estos detectores pueden considerarse como cámaras de ionización en donde las partículas cargadas entrantes ionizan la liberación de gas. La diferencia principal entre una cámara de ionización y una cámara de placas paralelas es la geometría que constituye al detector. Son detectores que proporcionan un sistema rápido de disparo de muones y complementan otras tecnologías de detección de muones. Su desarrollo temprano en la década de los ochentas ha sacado provecho de su geometría planar y del uso de electrodos resistivos. Como estos detectores es el objeto de este trabajo, explicaremos más de ellos en la siguiente sección.

2.3 DETECTORES DE CÁMARA DE PLACAS RESISTIVAS.

El componente básico de cualquier cámara de placas resistivas es un gap o espacio entre dos placas paralelas lleno de una mezcla de gases. Una cámara de placas resistivas puede ser simple, con un solo gap de gas, o puede tener más de un gap de gas y en ese caso se dice que es una RPC multigap (mRPC). Estas placas o electrodos están sometidos a un alto voltaje (HV) y al menos uno de ellos está recubierto de un material de alta resistividad previniendo chispas y descargas dentro de la cámara. El voltaje puede ser aplicado (positivo o negativo) solo a una placa y la otra conectarla a tierra, o aplicar el voltaje a ambas placas. Son utilizados en su mayoría para la detección de muones aunque no solo sirven como contadores de partículas también son utilizados como detectores de temporización. [4]

En una cámara de placas paralelas, un muón energético atraviesa la cámara ionizando las moléculas de la mezcla de gases que fluye dentro del detector, produciendo iones y electrones. La mezcla de gases que se utiliza para llenar el gap debe tener un alto coeficiente de absorción a la luz ultravioleta evitando la propagación de fotones y posibles descargas secundarias.

Estos detectores han sido bien recibidos porque además de tener una alta eficiencia de detección, por arriba de 90%, también su costo de producción es bajo ya que sus materiales de construcción son comunes y simples, además son detectores fáciles de construir y operar, son estables a largo plazo y su captura de datos es simple, también su gran área de detección representa una ventaja [5]. Son detectores utilizados en experimentos de altas energías y astropartículas, como en el experimento ATLAS del CERN en donde cubren un área de 3650 m² y cuentan con 350, 000 canales de lectura. [6]

2.3.1 MATERIALES PRINCIPALES DE CONSTRUCCIÓN DE LAS RPC

Antes de 1981, J. Warren Keuffel, del Instituto Tecnológico de California, en 1949 publicó su trabajo llamado <<Parallel-Plate Counters>> en donde presenta el primer contador experimental que consistía en unos discos paralelos de molibdeno, con un área de 3.1 cm² y 2.5 mm de gap, además sus electrodos eran rectángulos de cobre de 35 cm². En 1970, Pestov, en conjunto con otros físicos, publicaron sobre un contador de descargas localizadas, el cual eran dos placas

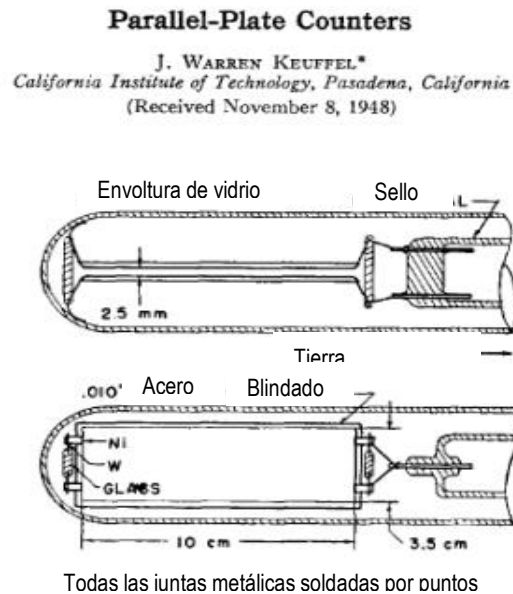


FIGURA 10. CONTADOR DE PLACAS PARALELAS, ANTECEDENTE DE LAS RPC. SE PUEDE VER UN GAP DE 2.5 MM.

de vidrio separadas entre sí. Una placa era de vidrio común y la otra de vidrio semiconductor. En 1981 Rinaldo Santonico y Roberto Cardarelli presentaron al <<contador de placas resistivas>>, muy similar al detector presentado por Pestov, sin embargo, cambiaron el vidrio por un plástico de alta estabilidad térmica con coeficiente de resistividad, 10^{10} - 10^{11} Ω, similar al vidrio. Este plástico, también conocido como baquelita, es una resina fenólica o resina de fenol y formaldehído, en una razón 2:3. Es el primer plástico sintético creado en los primeros años de la década de 1900 y recibe su nombre en honor a su creador Leo Baekeland [7]. El cambio de vidrio a baquelita facilitó aún más la

construcción de las RPCs y a partir de entonces se popularizaron. Sin embargo, hoy en día se prefiere la utilización del vidrio.

Para mantener la separación entre las placas se insertó un marco rectangular de cloruro de polivinilo (PVC) de 1.5mm de espesor, el cual también contenía la mezcla de gases. El marco se pegó al electrodo negativo para hacer con él un segundo panel rígido en donde las superficies de las placas de baquelita miraban hacia el gas. El campo eléctrico era aplicado conectando al alto voltaje una placa de baquelita a la cual se le había pegado una lámina delgada de papel conductor, y la tierra era conectada a una lámina de cobre que estaba pegada a la otra placa de baquelita del lado que no mira al gas. Los pulsos eran leídos a través de unas tiras de cobre no conectadas al alto voltaje, eléctricamente aisladas de la lámina conductora gracias a la placa de (PVC). En la figura siguiente se muestra el esquema del RPC construido por Santonico y Cardarelli.

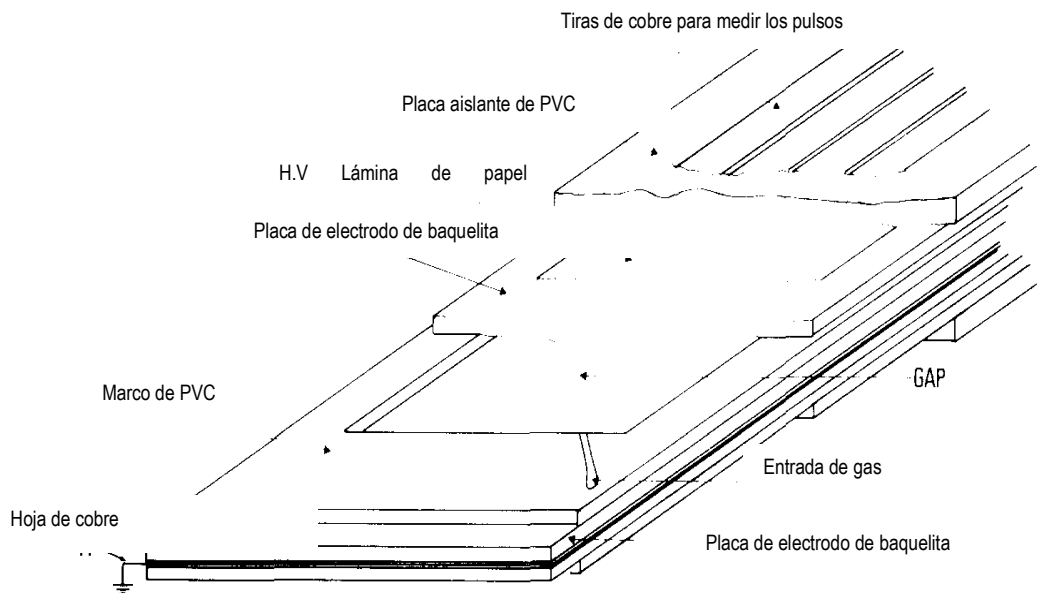


FIGURA 11. DIAGRAMA DE LA RPC MOSTRADA POR SANTONICO Y CARDARELLI. CORRESPONDE A DOS RPC'S SUPERPUESTAS.

A pesar que el uso de la baquelita representó una ventaja por el bajo costo del material y su facilidad de operar las RPC a presión atmosférica, el vidrio no dejó de utilizarse. Debido a su proceso de fabricación, el vidrio ofrece mayor

rigidez que la baquelita y su coeficiente de resistividad esta en el orden de 10^{10} - $10^{14} \Omega$, también posee un espesor uniforme y una superficie lisa, ahorrándose así el recubrimiento de linaza utilizado en los RPC's de baquelita para reducir el número de eventos registrados en el detector cuando no hay una fuente de radiación incidiendo en el RPC, lo que permite colocar los pads o tiras cobre más cerca de las descargas. Al utilizar vidrio para la construcción de la RPC permite prescindir del uso del PVC para crear el gap de gas. En la actualidad los vidrios utilizados en la construcción de RPCs son vidrios de silicato de sodio-cal (SLS) y vidrio de silicato de baja resistividad (LRS) [8]

2.3.2 MODOS DE OPERACIÓN

Estas cámaras de ionización pueden operar en dos modos diferentes según el voltaje aplicado: modo avalancha o modo streamer.

I. MODO AVALANCHA

En las cámaras RPC se ioniza una mezcla de gas cuando una partícula, muones energéticos en general, atraviesa la cámara. Para que la ionización se lleve a cabo es necesario contar con un campo eléctrico masivo, del orden de 10 kV/cm [5], para crear un alto voltaje (HV) dentro de la cámara, teniendo pulsos de ~ 1 ns. En el momento en que la partícula cruza la RPC iones se aceleran hacia el cátodo (electrodo negativo) y electrones se aceleran al ánodo (electrodo positivo).

La aceleración de los electrones es mayor debido a que tienen menor masa que los fotones, así los electrones ganan un impulso tal que colisionará con otras moléculas de gas ionizándolas también. En general, las colisiones de electrones con moléculas de gas generan más electrones libres, teniendo lo que se llama multiplicación de Townsend [9], la cual tiene un crecimiento suave pero exponencial. Esta multiplicación se repite para los electrones secundarios teniendo como resultado final una avalancha de electrones en la ruta del ánodo. De esta manera, es posible inducir una carga grande, lo suficiente para medirla

con ayuda de la electrónica. En comparación con la carga inducida en el modo streamer, la carga inducida en una avalancha estándar es baja, sin embargo, este modo permite una operación más estable. La carga en una avalancha es proporcional a:

$$\bar{q} \propto e^{\alpha(V)g}$$

donde \bar{q} es la carga de la avalancha, $\alpha(V)$ es el coeficiente de Townsend que depende del potencial eléctrico a través de la cámara y nos dice el número de ionizaciones por unidad de longitud, y g es la longitud del espacio del gap. Gracias a la alta resistividad en los electrodos la carga inducida se limita a la ubicación real de la avalancha.

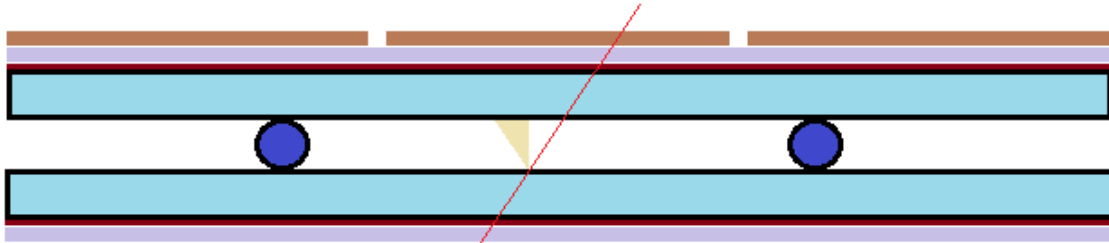


FIGURA 12. VISTA TRANSVERSAL DE UNA AVALANCHA EN UNA RPC. AZUL CELESTE: PLACAS PARALELAS, ROJO: RECUBRIMIENTO DE GRAFITO, LILA: AISLANTE, MARRÓN: TIRAS DE LECTURA.

II. MODO STREAMER

El modo streamer es operado de tal manera que el campo eléctrico es grande. Se producen descargas continuas debido a que la ionización secundaria produce una descomposición del gas. [9] [5] La señal generada son pulsos de amplitudes entre $\sim 100 - 200$ mV y la ganancia de electrones puede subir hasta 108, por lo que no necesita amplificador, por lo tanto, la lectura del RPC en modo streamer es bastante simple. El campo eléctrico dentro de la cámara mantiene una intensidad suficiente para generar una descarga limitada localizada cerca de donde la partícula ionizante a cruzado. Cuando se trata de operar los RPCs en modo avalancha los streamers no son muy deseados porque la capacidad de conteo del detector disminuye, en cambio, para experimento de rayos cósmicos y aceleradores de baja tasa el modo streamer es el adecuado. En general, un

streamer es cualquier golpe de carga alrededor de 2000 ADC adecuado para experimentos de rayos cósmicos y aceleradores de baja tasa. Para medir la fracción de streamer:

$$\text{Fraccion de Streamer} = \frac{\# \text{ de golpes } Q > 2000}{\# \text{ de golpes}} \times 100$$

No solo la diferencia de voltaje determina el modo en que se está operando el detector, también lo hace la mezcla de gases.

2.3.3 CORRIENTE Y CARGA INDUCIDA

Ya se mencionó que al cruzar una partícula por la cámara de gas de la RPC tenemos iones y electrones acelerándose a los electrodos, es así como se induce una corriente en los electrodos. La velocidad de deriva de los iones es menor que la velocidad de deriva de los electrones, por eso los valores de las corrientes inducidas en los electrodos son diferentes. Para tener una señal limpia se debe considerar que las avalanchas se posicionan donde las líneas de corriente del campo eléctrico de ponderación son uniformes.

Para medir la corriente inducida en el electrodo en cualquier tiempo hay que tomar en cuenta el campo de ponderación, E_w , que es el campo eléctrico en el espacio de gas si colocamos el electrodo captador en el potencial de ponderación, V_w y conectamos a tierra todos los demás. Considerando la carga del electrón, la velocidad v de deriva del electrón dentro del gas y el número de electrones en el instante t , $N(t)$, la corriente inducida es calculada con la siguiente expresión:

$$I(t) = \frac{E_w}{V_w} evN(t)$$

El cociente $\frac{E_w}{V_w}$ está determinado por la permitividad del vidrio y su grosor, como también por el grosor del gap [4], entonces:

$$\frac{E_w}{V_w} = \frac{\epsilon_r}{3g+2d\epsilon_r}$$

Sin embargo, para la expresión del campo eléctrico no usamos el campo eléctrico de ponderación, de hecho, hay que considerar que a pesar de que el vidrio es un dieléctrico también tiene un coeficiente de conductividad. Por tanto, si se asume que el valor más pequeño de la carga se conduce a través del vidrio, se puede esperar que pasado el tiempo necesario toda la carga de los electrodos HV se coloque en los otros extremos de cada vidrio si es una mRPC. Siguiendo este razonamiento, las placas de vidrio que estén en medio tendrán un potencial cero, 0 V. Como tenemos HV en cada gap, tenemos el campo eléctrico:

$$E = \frac{V}{d}$$

Recordemos que el crecimiento de los electrones es exponencial entonces, la carga crecerá de la misma manera y, por consiguiente, la corriente tendrá un crecimiento exponencial también. Podemos decir que la carga se distribuirá del mismo modo dentro de la avalancha y la corriente instantánea inducida debido a la carga presente en el momento t , está dada por la expresión matemática:

$$i(t) = Ae^{(\alpha-\eta)vt}$$

A es la amplitud de la señal y $(\alpha - \eta)$ es el coeficiente efectivo de Townsend. Note la diferencia entre la ecuación $(I(t))$ que representa la corriente inducida en los electrodos y $(i(t))$ es la corriente inducida instantánea.

Por otro lado, para explicar la carga inducida dentro de las RPC nos apoyaremos de las cámaras de ionización simples. La configuración de estas cámaras es como la de las RPCs, con diferencia del material de las placas, que son metálicas. Cuando una partícula atraviesa la cámara ioniza N_0 moléculas de gas. El campo eléctrico en una cámara de ionización estándar es bastante pequeño, así que no produce ninguna multiplicación de Townsend, aunque sí los iones se acumulan en el cátodo y los electrones en el ánodo.

Para un tiempo de integración de señal infinito, la carga total inducida, q_{ind} , será igual en tamaño a la carga total de los electrones liberados si se tuviera en cuenta la señal electrónica e iónica. [8]

$$q_{ind} = N_o e$$

Pero esto es para una cámara con placas metálicas y por la naturaleza de las placas la carga inducida se extiende por la superficie del detector. En el caso de las RPCs, los electrodos son de un material resistivo, por lo que la carga inducida no es igual que una cámara de ionización simple. En una RPC la carga inducida está localizada en la posición donde ocurre la avalancha. Entonces, la señal inducida en el plano de lectura de una RPC es

$$q_{ind} = \frac{e}{\eta g} \Delta V_w \sum_{j=i}^{n_{cl}} n_0^j M_j [\exp(\eta(g - x_0^j)) - 1]$$

donde η es el coeficiente de Townsend, M_j tiene en cuenta las variaciones estocásticas de los tamaños de las avalanchas, ΔV_w es la caída de potencial de ponderación y se toma en cuenta cada uno de los n_{cl} grupos creados por la partícula ionizante en la posición inicial x_0^j , que contiene n_0^j electrones. El coeficiente de Townsend representa el número de ionizaciones por unidad de longitud.

La señal de la corriente inducida es leída mediante unos electrodos que no están conectados al alto voltaje, por lo cual pueden tener una forma y dimensión libre. Las formas más comunes son los conocidos strips y pads.

Los strips son tiras paralelas entre sí, que cubren el largo de la superficie del detector y tienen apenas unos centímetros de ancho; los strips se usan en pares, es decir, una configuración de strips por ambas caras del detector y perpendiculares entre ellas. De esta manera tenemos una lectura bidimensional, debido a lo cual se puede leer las coordenadas de impacto de la partícula que incide en el detector.

Los pads se usan solo en una cara del detector y consisten en rectángulos o cuadrados dibujados en una placa de cobre, y pueden ser tantos como se desee. Los pads funcionan con una dimensión y forma libre, y siempre cubren el área activa del detector. Como proporcionan una lectura unidimensional, no se recomienda su uso si se desea calcular la resolución espacial del detector.

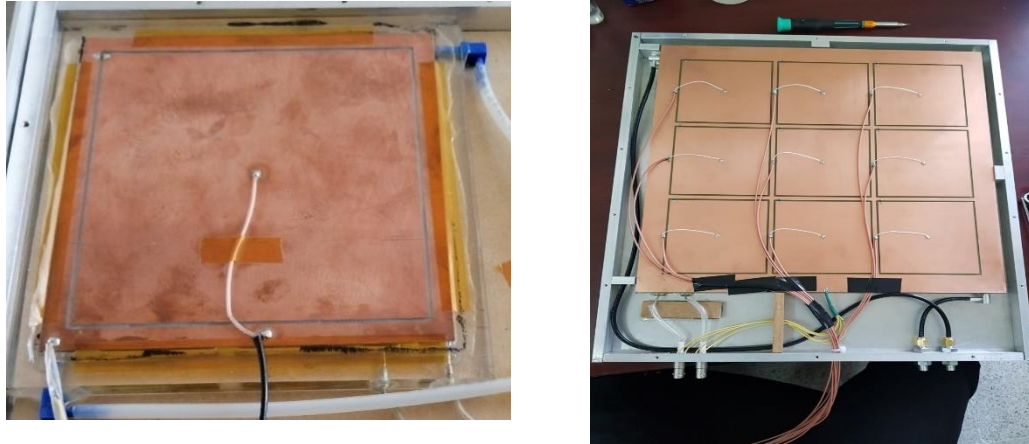


FIGURA 13. IZQUIERDA: RPC CON UN SOLO PAD DE LECTURA. DERECHA: RPC CON 8 PADS.

Cada strip o pad tiene su propio cable por el cual se lee la señal inducida en canales independientes por medio del osciloscopio.

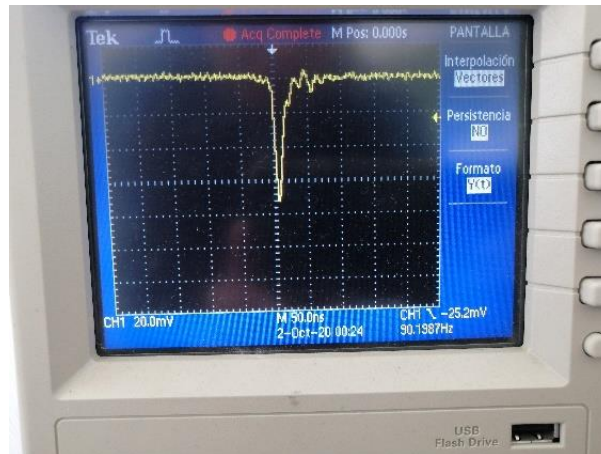


FIGURA 14. SEÑAL DE LA CORRIENTE INDUCIDA.

2.3.4 MEZCLA DE GASES.

El rol de la mezcla de gases asume un papel importante dentro de los detectores. A causa del movimiento térmico aleatorio las diferentes moléculas de gas interactúan entre ellas. Un tipo de interacción son las colisiones de transferencia de carga, que resultan cuando los iones positivos chocan con moléculas neutras, intercambiando sus cargas. Estas colisiones representan una pérdida de energía, por lo que las moléculas con mayores potenciales de ionización tendrán que transferir sus cargas a moléculas con menores potenciales de ionización.

Los electrones sufren aún más colisiones en su camino a los electrodos. Por esta razón la mezcla de gases debe permitir una trayectoria libre media de los electrones que le conceda llegar al ánodo sin que éstos colisionen con otras moléculas de gas, iones u otros electrones, formando iones negativos.

Todos los gases tienen un potencial de ionización y a medida que las cargas son aceleradas alcanzarán mayores energías cinéticas entre las colisiones hasta el punto en que esta energía supere el potencial de ionización de las moléculas de gas. Cuando se supera este potencial se producen ionizaciones secundarias. Por el razonamiento anterior se deduce que habrá un umbral para los gases en el que el campo eléctrico es grande, lo suficiente como para acelerar los electrones entre las colisiones a energías por encima del potencial de ionización del gas, este umbral ronda los 10 kV/cm.

Otras características importantes en la elección del gas o mezcla de gases son la baja emisión o transmisión de fotones y una alta densidad en la creación de pares ion-electrón para asegurar una eficiencia alta de detección. También se debe asegurar que los gases utilizados en las RPCs no sean agresivos con el medio ambiente ni con el ser humano. Dependiendo del modo de operación de la RPC, será la mezcla de gases utilizada para su funcionamiento. [10]

2.3.5 EFICIENCIA.

Como ya vimos, el movimiento de partículas, iones y electrones, induce una carga en los electrodos creando una señal. Esta primera ionización crea grupos de electrones a lo largo de su trayecto hacia el ánodo. Estos grupos de electrones, n_{cl} , dependen de la energía ionizante de la partícula que atravesó, de la mezcla de gases y del ancho del gap. Podemos medir la densidad de grupos, como el cociente de número de grupos por milímetro, λ , entre el coseno del ángulo incidente, ϕ [11]:

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda}{\cos \phi}$$

Sí tenemos un detector de un simple gap de gas, la eficiencia se mide como

$$\epsilon = 1 - e^{-\lambda_{eff}d}$$

Para un número, n , de gaps independientes, la eficiencia total será:

$$\epsilon_{tot} = 1 - (1 - \epsilon_{gap})^n$$

Por lo tanto, la probabilidad que cada gap sea ineficiente (entendemos la ineficiencia como el complemento de la eficiencia) es:

$$1 - \epsilon_{tot} = (1 - \epsilon_{gap})^n$$

CAPÍTULO 3

FABRICACIÓN Y DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA RPC.

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA RPC.

El detector aquí presentado, una cámara de placas resistivas (RPC), tiene dimensiones de 120 cm x 90 cm, con dos gaps de 0.1 cm, cada uno. Se hace la siguiente precisión: se denomina como gap al espacio creado entre placa y placa por el cual circula gas. Para la construcción del gap se utilizó hilo de pescar de 0.1 cm de diámetro. Las placas de la RPC son de vidrio, el cual tiene un espesor de 0.2 cm. Se cortaron 2 placas de 120 x 90 cm de este vidrio para formar los dos gaps. La estructura del detector fue introducida en una caja de acrílico que se construyó con medidas exactas para esta RPC, y, por último, la caja de acrílico se encerró en una caja de aluminio protegiendo al detector y dejándolo listo para su operación. A continuación, en la figura 15 se muestra una diagrama del corte transversal de la cámara de placas resistivas.

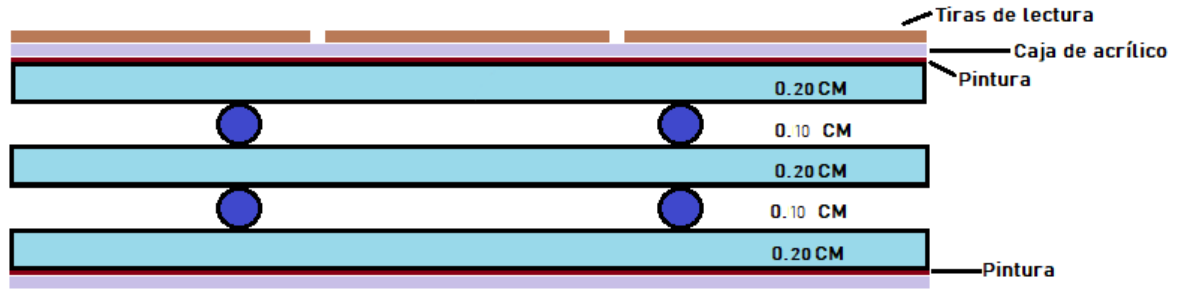


FIGURA 15. DIAGRAMA DEL CORTE TRANSVERSAL DE LA RPC CONSTRUIDA.

La construcción de la RPC se comenzó cortando y limpiando con extremo cuidado las placas de vidrio, para la limpieza se utilizó alcohol metílico. Luego de que cada placa de vidrio se haya limpiado como es requerido, se seleccionaron las dos placas de vidrio con menos imperfecciones y a estas se les pegó un rectángulo de cinta de cobre a 2 mm y 4mm de borde de algunos de los dos lados más cortos, respectivamente, dejando la mitad del rectángulo

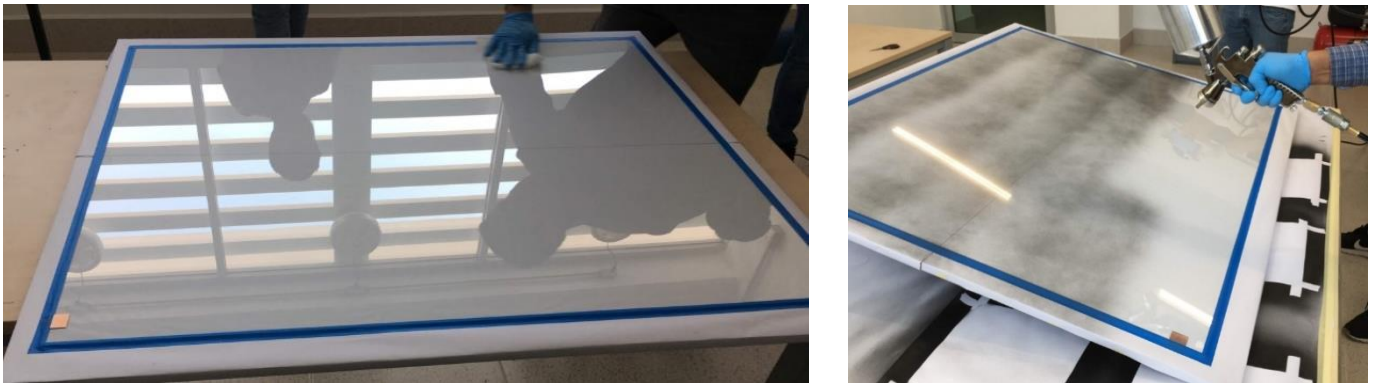


FIGURA 16. VIDRIOS LISTOS PARA SER PINTADOS.

“volando” por fuera del borde. Por medio de esta cinta es que se aplica el alto voltaje a la RPC. Después que se haya fijado la cinta de cobre en las dos placas de vidrio, con cinta de baja adherencia se delimitó un marco de 5 mm y se procedió a aplicar el recubrimiento resistivo. El recubrimiento resistivo consiste una aleación de pintura acrílica con grafito. La pintura se aplicó con una compresora y pistola rociadora.



FIGURA 17. PLACA DE VIDRIO PINTADA.

Se aplicaron 3 capas de pintura de la siguiente manera: de derecha a izquierda cubriendo toda el área del vidrio y una vez seca la pintura, de arriba hacia abajo, completando así la primera capa. Antes de aplicar la última capa de pintura, se remarcó el borde con pintura de plata y una vez seca se completó la aplicación de pintura de grafito. La mezcla de pintura acrílica con grafito tiene una alta resistividad superficial, por lo que provee un campo eléctrico uniforme, la resistividad de la pintura es $5 \Omega/\blacksquare$; por otro lado, la pintura de plata distribuye de manera uniforme el alto voltaje.

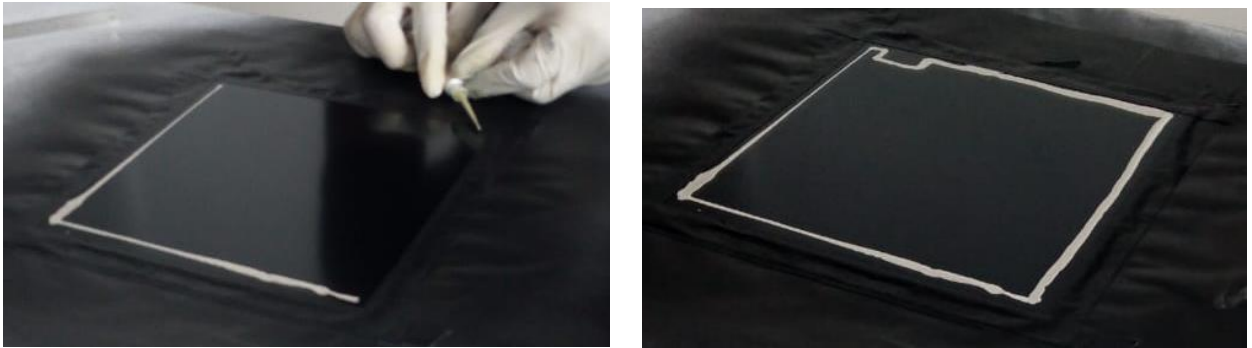


FIGURA 18. APLICACIÓN DE LA PINTURA DE PLATA.

Para la caja de acrílico se cortaron cuatro barras de acrílico de 125 x95 cm y dos tapas de acrílico de 127.5 x 97.5 cm. A las barras de acrílico se les hizo una especie de “escalón” por ambos lados, quedando una forma de ‘T’, y los extremos se cortaron en ángulo de 45°; también a dos de las barras se les hizo una

perforación, a cada una, para la entrada y salida del flujo del gas y entradas de cables que se conectaron con la fuente de alto voltaje. El marco, así como las tapas, fueron pegadas con resina epoxy. Primero se pegaron las barras cuidando que los vértices formen un ángulo preciso de 90° , y una vez que secó la resina se pegó una tapa de acrílico. Cuando la tapa secó por completo, se limpió todo con alcohol metílico y con una compresora de aire para retirar cualquier partícula que haya quedado dentro del marco. Con ayuda de unos espaciadores hechos a medida de la RPC se arma la estructura del detector. Estos espaciadores se imprimieron en una impresora 3D, tienen una forma de 'U' cuadrada en donde la parte central tiene unos orificios de 0.1 cm que es justo la medida del hilo de pescar que se utilizó para crear el gap, cada orificio está separado entre sí por 0.2 cm.

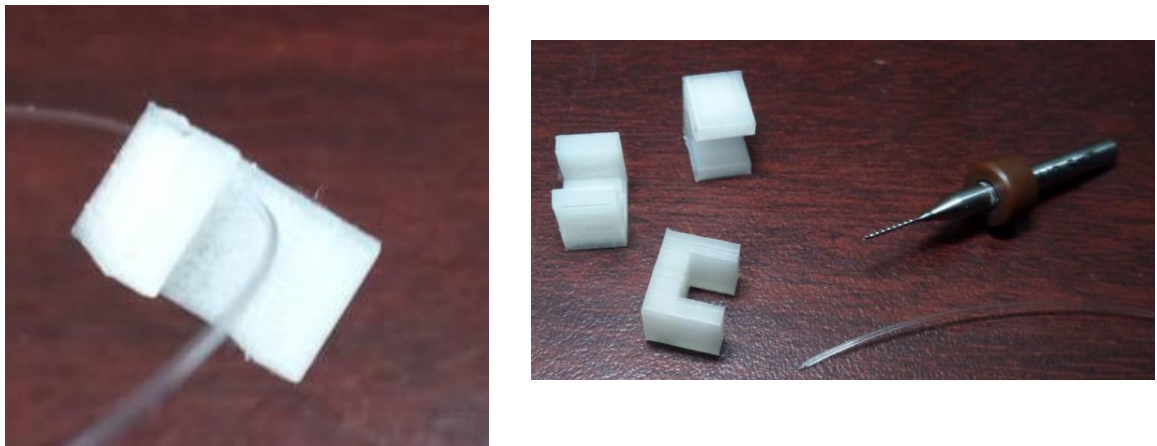


FIGURA 19. ESPACIADORES.

Antes de ensamblar la RPC, se pegaron los conectores de gas y los cables que se conectaron a los electrodos de la RPC, también se cortaron segmentos de hilo pescar del largo suficiente para atravesar el largo del detector. Se comenzó colocando una de las placas de vidrio que se pintaron dentro del marco de acrílico, con la cara pintada mirando a la tapa de acrílico. Luego, en extremos opuestos se fijan los espaciadores a los cuales ya habíamos atravesado por los

orificios los segmentos de hilo de pescar que habíamos cortado. Una vez fijados se atravesó de un extremo al otro el hilo de pescar tensándolo lo suficiente sin llegar a estirarlo.



FIGURA 20. FORMACIÓN DEL GAP DE GAS.

Tenso el hilo de pescar colocamos la placa de vidrio sin pintar y repetimos el proceso de atravesar el hilo y tensarlo. Por último colocamos la otra placa de vidrio con la pintura viendo hacia afuera del arreglo de gaps. Antes de cerrar el marco de acrílico se verificó que todo este fijo y se limpió con aire, expulsando

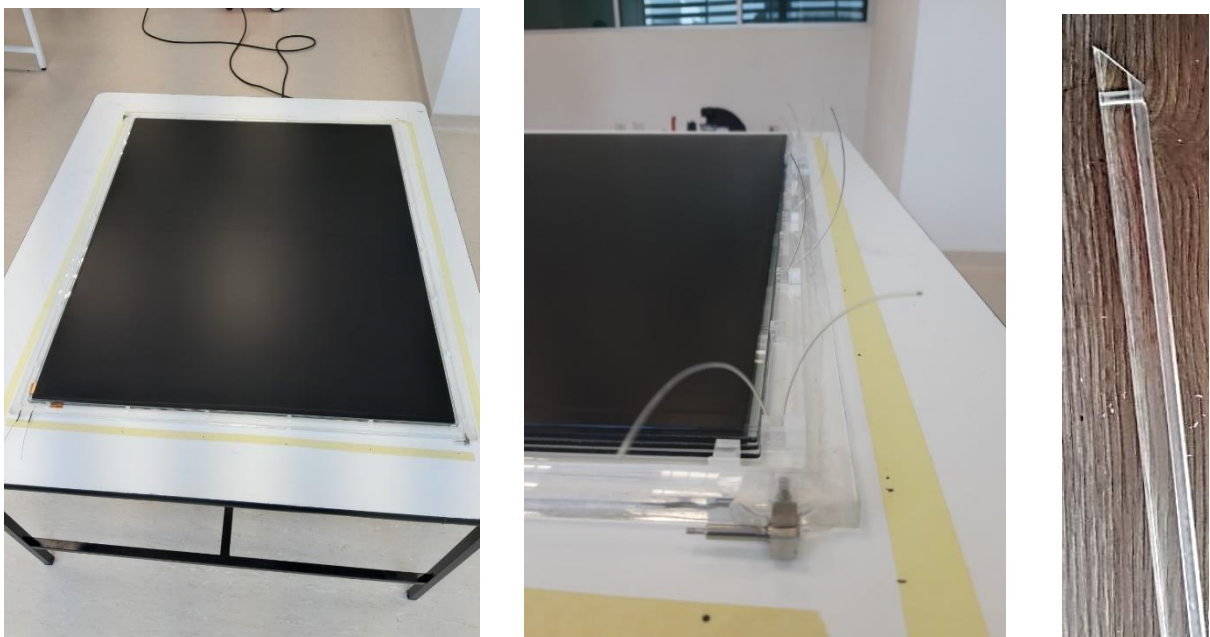


FIGURA 21. IZQUIERDA Y CENTRO: RPC ENSAMBLADA EN EL MARCO DE ACRÍLICO. DERECHA: BARRA DE ACRÍLICO PARA ARMAR EL MARCO.

cualquier tipo de partícula que pudiera caer dentro del arreglo. Finalmente se pegó la segunda tapa de acrílico, sellando así la RPC.

Para la recolección de la señal se hicieron 108 pads de 10 x 10 cm, con una placa de cobre que cubre el área efectiva del detector de 120 x 90 cm. Antes de proteger el detector en una caja de aluminio, se hicieron las conexiones para el gas, el alto voltaje y la captura de datos, como se muestra en la siguiente imagen.

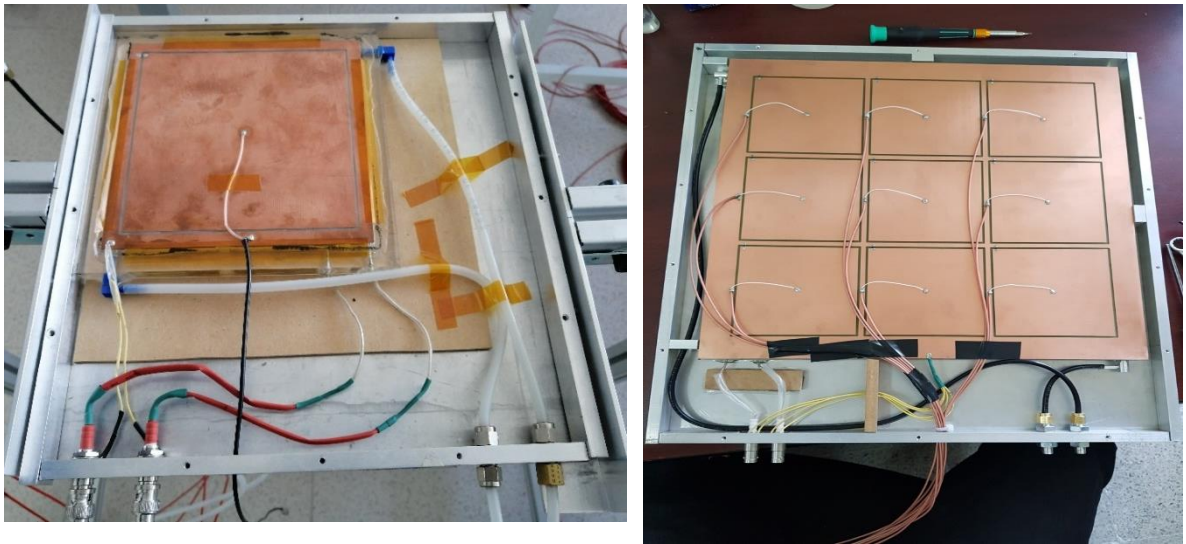


FIGURA 22. EJEMPLOS DE RPC LISTA PARA OPERAR.



FIGURA 23. EJEMPLO DE MÓDULO RPC LISTO.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.

Antes de caracterizar el detector se debe limpiar por dentro haciendo fluir Argón por el lapso de una semana, aproximadamente. De esta manera, también nos aseguramos que al momento de hacer mediciones no haya una mezcla de gases no deseada. El flujo del gas en circulación es controlado por medio de un burbujeador que se conecta a la salida del flujo de gas del detector.

Sin cambiar el tipo de gas, se comienza por calcular la resistividad de la cámara, aplicando una diferencia de potencial entre los electrodos del detector con una fuente de voltaje CAEN. Cada electrodo es conectado a un canal de la fuente de voltaje. Uno de los canales se mantiene con un voltaje fijo de 1000 volts, en el otro canal se varía el voltaje de 100 en 100 volts hasta llegar a 5500 volt. La fuente voltaje nos proporciona el dato de la corriente consumida por el detector en cada canal, en microamperios. Los datos obtenidos son graficados.

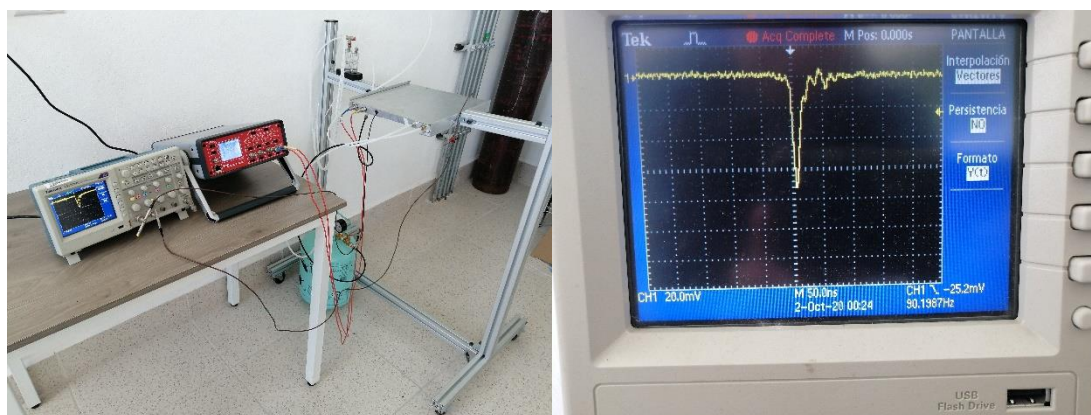


FIGURA 24. IZQUIERDA: PRIMER ARREGLO EXPERIMENTAL. DERECHA: SEÑAL LEÍDA POR EL OSCILOSCOPIO.

Para el cálculo de la eficiencia y de la resolución temporal se cambia el gas Argón por gas Freón. Se cambia el arreglo experimental añadiendo tres tubos fotomultiplicadores (PMT por sus siglas en inglés) uno por debajo de la RPC y los otros dos por arriba, a manera de “sándwich”. La señal del detector se pasa por un amplificador antes de pasar por un Constant Fraction Discriminator (CFD), un dispositivo para el procesamiento de señales electrónicas con el cual

permite recuperar solo aquellos pulsos que superen el umbral definido, es decir, que podemos crear pulsos cuadrados con una amplitud constante. Las señales de los tubos fotomultiplicadores pasan de manera directa al CFD. Después de pasar las señales por el CFD, pasan por un digitalizador, CAEN 742, y la señal digitalizada la visualizamos a través del monitor de la PC:

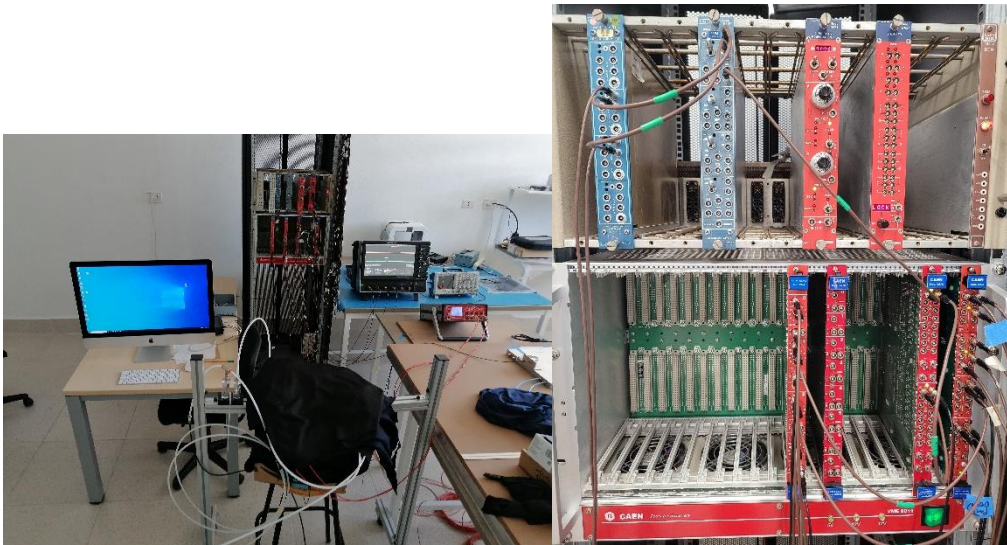
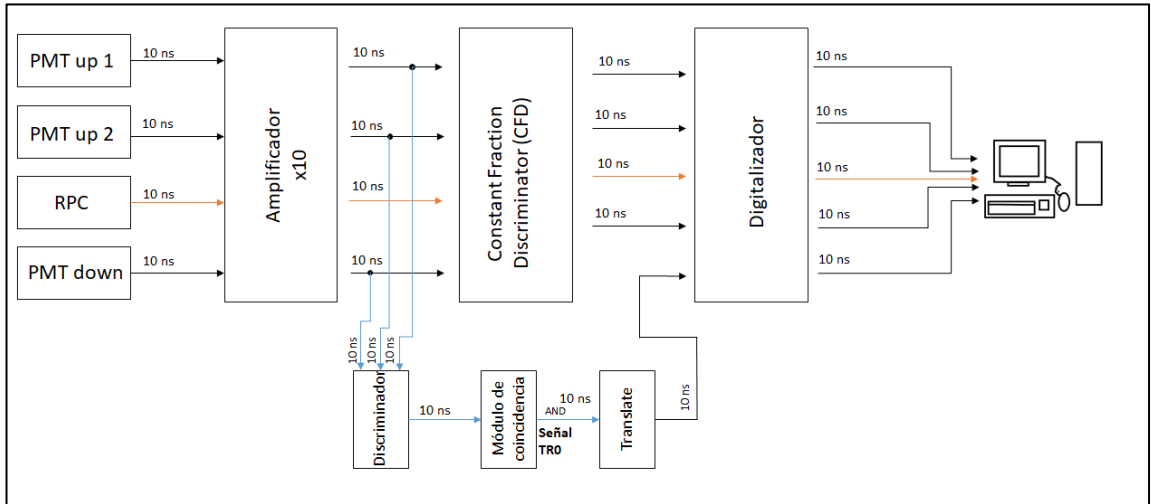


FIGURA 25. ARRIBA: DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL; ABAJO-IZQUIERDA: FOTOGRAFÍA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL; ABAJO-DERECHA: MÓDULOS UTILIZADOS

En el diagrama que se presenta del arreglo experimental, se puede notar que la señales de los PMT son “sumadas” y tanto las señales individuales de los PMT’s, como la del AND es pasada por el CFD. A la señal obtenida por el AND

lógico de las señales de los PMT's es lo que llamamos TRIGGER, La señal de Trigger es creada para asegurar eventos en la RPC, es decir, si una partícula es detectada por los PMTs de arriba y luego por el PMT de abajo, existe mayor probabilidad de que la partícula haya atravesado también a la RPC, ya que esta se encuentra en medio de los tres PTM's. Por esta razón, en la visualización de las señales digitalizadas, la señal del Trigger se ve retrasada de las señales de los PMT's y de la RPC, por el tiempo de operación del AND lógico.

3.3 DIGITALIZADOR CAEN 742.

El digitalizador CAEN 742 es un digitalizador condensador conmutado basado en el chip DRS4 que utiliza en protocolo de comunicación Serial Peripheral Interfaz (SPI), un protocolo síncrono, donde la sincronización y transmisión de datos se realiza por medio de 4 señales de reloj, por cada señal de reloj se envía o lee un bit. Las frecuencias de muestreo del digitalizador van de 5, 2.5, 1 y 0.75 GS/s y se permite medir resoluciones de tiempo de hasta 50 ps. El chip consta de 1024 celdas capacitivas que muestrean las entradas análogas a la frecuencia que se seleccione por medio del software que controla toda la adquisición de datos, WaveDump. [12]

La señal se muestrea mediante ADC y se almacena en memorias digitales para luego ser leídas por diferentes interfaces de comunicación (USB, VMEbus y enlace óptico). El digitalizador puede funcionar como un osciloscopio adquiriendo formas sin procesar o realizar un procesamiento para obtener parámetros como la amplitud del pulso, la carga, la marca del tiempo o la discriminación de la forma del pulso. Las técnicas de digitalización son dos: Flash ADC y Switched Capacitor. Los flashes ADC son convertidores A/D muy rápidos, de manera que la conversión analógica a digital se hace casi al mismo tiempo, permitiendo que se graben formas de onda sin tiempo muerto debido a la conversión.

La digitalización brinda beneficios como estabilidad y reproductibilidad, además de capacidad de reprogramar y ajustar los algoritmos a la aplicación y preservar todos los datos a lo largo de la cadena de adquisición, flexibilidad, mejor corrección de la fluctuación de la línea de base, acumulación y mucho más, todo en una tarjeta.

Como ya se mencionó, los pulsos analógicos son muestreados por el chip DRS4, que consiste en una cadena de inversor en chip que genera una frecuencia de muestreo. La adquisición del registro y su longitud está limitada por el número de celda, 1024 muestras. Las muestras analógicas son digitalizadas por el ADC de 12 bits a una frecuencia de 29,296 MHz, y su salida se almacena por la FPGA (dispositivo programable) en el búfer de memoria digital. El TR0 único se divide en dos chips DRS4. Las líneas de retardo son iguales en las dos rutas; de todos modos, es posible que existan pequeñas diferencias en las muestras digitalizadas debido a diferencias en los chips y en los ADC. Cuando la digitalización del TR0 está habilitada, hay una doble conversión que aumenta el tiempo muerto de 110 microsegundos cuando solo las entradas se convierten a 181 microsegundos cuando también se convierte el TR0. En palabras más sencillas, el tiempo muerto por conversión A/D, para cada evento (1024 muestras) son 110 μ s cuando las entradas son solo analógicas, y 181 μ s cuando las entradas son analógicas más la entrada TR0.

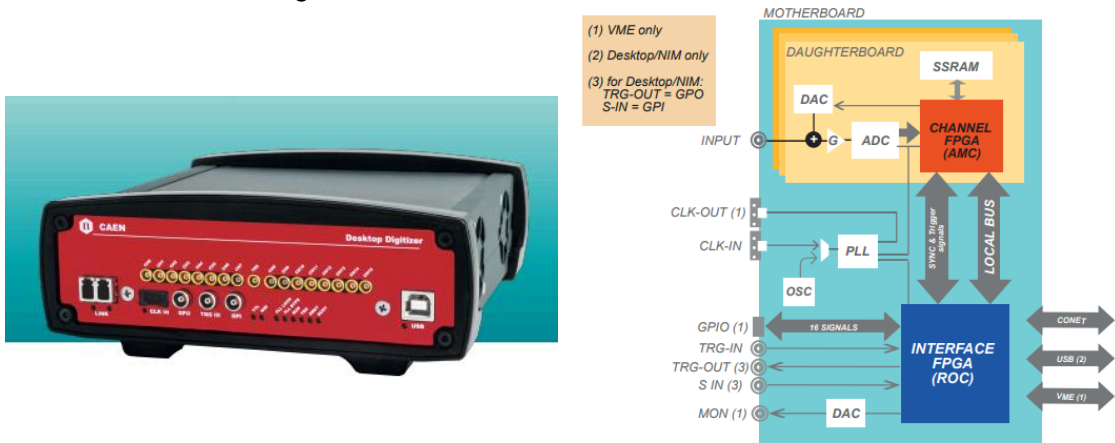


FIGURA 26. A) DIGITALIZADOR, B) DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE LA TARJETA MADRE.

3.4 TRIGGER

Ya se hizo mención que el Trigger es la puerta lógica AND que se forma al pasar las tres señales de los PMT's por el módulo de coincidencia. Esta señal es importante ya que nos asegura la existencia de un evento. Es decir, la señal de Trigger es obtenida cuando una partícula es detectada por los tres tubos fotomultiplicadores, de esta manera garantizamos que los pulsos obtenidos por la RPC sean eventos válidos, ya que al ser detectada la partícula por los tres PMT's, lo más seguro es que sea detectada por la RPC también.

En la práctica, es común tener una cuenta más elevada de número eventos dados por la señal del Trigger que por la señal de la RPC, de hecho, es común ver que el número de eventos registrados por la RPC es menos de la mitad del número de eventos registrados por el Trigger; esto sucede, entre muchos factores por el ruido electrónico que hay en el arreglo experimental, el cual en muchos casos es casi imposible de eliminarlo.

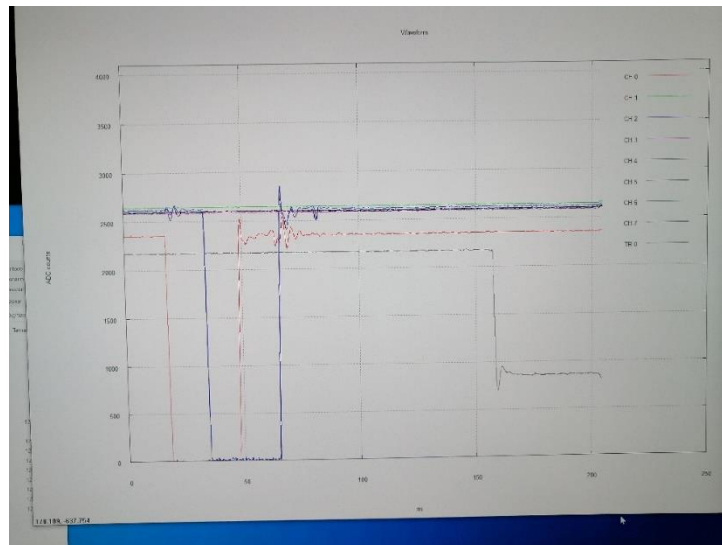


FIGURA 27. GRÁFICA DE LOS PULSOS DIGITALIZADOS.

También se puede notar en la gráfica de los pulsos de los detectores (ADC counts vs time), que la señal del TR0, que corresponde al Trigger, está retrasada

en el tiempo respecto a las señales de los PMT's y de la RPC (CH2, CH4, CH6, CH8), Este retraso, en realidad no es muy grande, es tan solo de unos nanosegundos, los mismo que le toman a la electrónica procesar las señales de los PMT's para hacer el AND y obtener el Trigger.

3.5 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE GASES

El flujo de gas se regula y monitorea por medio de un sistema contador de burbujas diseñado en el laboratorio, que consiste en un tubo externo con un diámetro de 6 mm y un tubo interno de 4 mm de diámetro; entre ellos existe una diferencia de presión. Se conecta un contador de burbujas a la entrada del flujo de gas del detector y otro a la salida del flujo de gas.

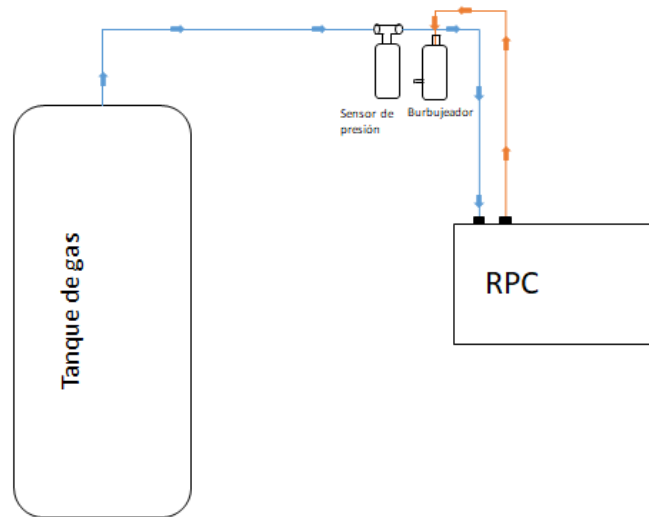


FIGURA 28. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE GAS.



FIGURA 29. IZQUIERDA: CONTADORES DE BURBUJAS. DERECHA: CONTADORES DE BURBUJAS CONECTADOS AL DETECTOR.

Antes de operar el detector para la toma de datos, es preciso hacer una prueba de fugas y limpieza de este mismo. Una vez hecha la limpieza y la verificación de ausencia de fugas, cambiamos el flujo de gas Argón, por gas Freón para la operación experimental del detector.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

4.1 PREPARACIÓN DEL DETECTOR

Es necesario realizar ciertas pruebas que nos ayudarán a verificar la construcción y actividad de nuestro detector antes de ponerlo en funcionamiento. Primero se hace una inspección física general del detector; en esta nos aseguramos que las tapas estén bien cerradas y selladas, que los conectores de gas estén fijos, también examinamos que no haya entrado pegamento a los gaps. Una vez terminada la inspección física pasamos a la revisión de fuga de gas.

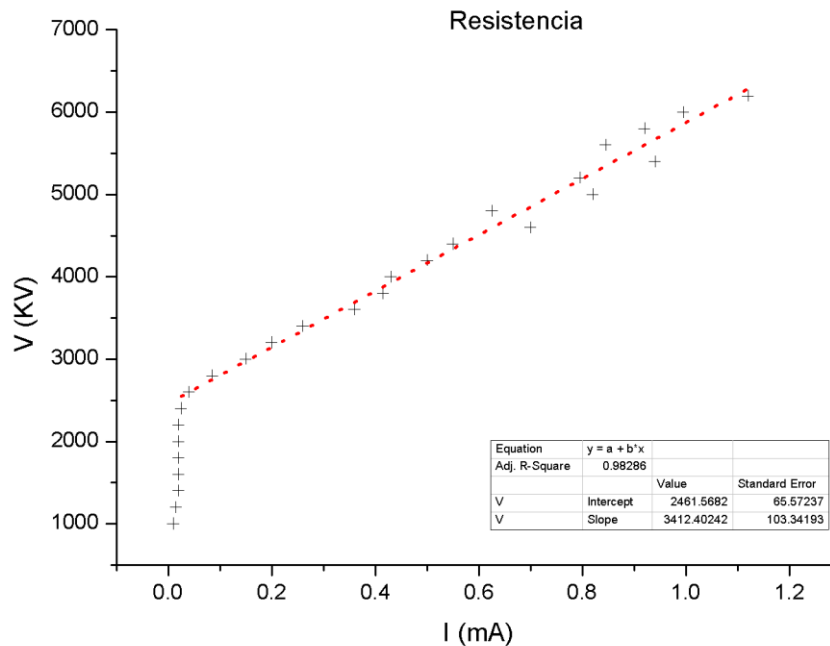
Las pruebas de fuga se hacen a través del sistema contador de burbujas. Como se mencionó en el capítulo anterior, hay un contador de burbujas a la entrada del flujo de gas y uno a la salida, se establece un flujo inicial de 4 cc/min, si el flujo de salida es igual al flujo de entrada se dice que no hay fugas, de lo contrario será necesario revisar las conexiones de gas, tanto del detector como de los contadores de burbujas y de los contenedores de gas; así como volver a la inspección física del detector.

Además de la inspección física y la prueba de fugas, se debe limpiar el detector haciendo fluir gas Argón dentro él, esto eliminará cualquier partícula que haya quedado dentro de este, lo cual, a su vez disminuye el riesgo de

polimerización. Y una vez pasado el tiempo de limpieza (se recomienda una semana de limpieza con Argón), aplicaremos voltaje para verificar la ausencia de chispas.

4.2 RESISTIVIDAD

Como se ha mencionado (y sí no, lo hacemos ahora), el recubrimiento resistivo ayuda a la uniformidad del campo eléctrico por el área activa del detector, por lo tanto, entre mayor uniformidad, mayor resistividad. No obstante, a voltajes muy bajos, el detector se comportará como un no conductor. En la gráfica número 1, de corriente contra voltaje, se puede apreciar el comportamiento del detector, cuando hacemos circular gas argón.



GRÁFICA 1: RESISTENCIA

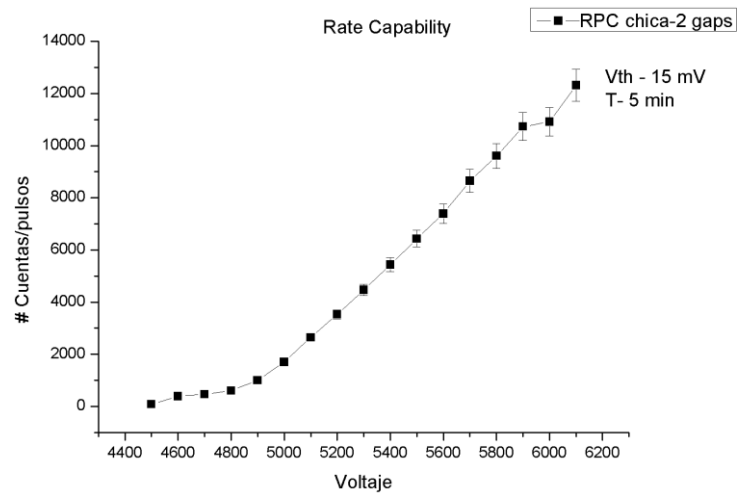
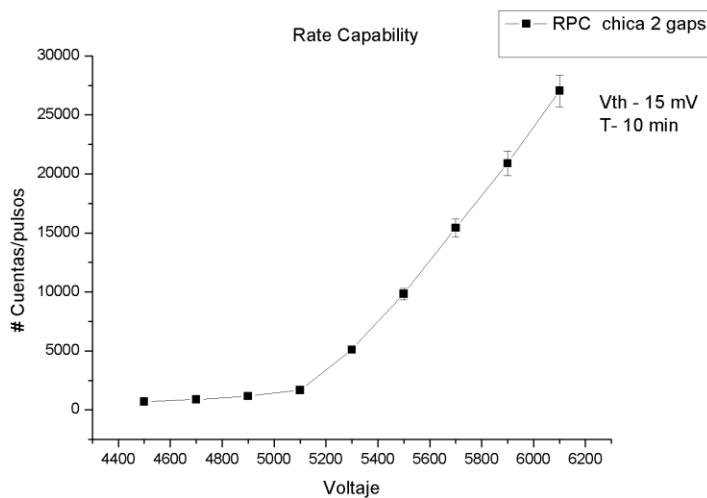
Podemos confirmar que a voltajes menores de 3KV, el comportamiento del detector es como el de un aislante, por arriba de ese voltaje su comportamiento es el de un conductor. Ahora bien, la resistividad de la RPC es obtenida midiendo la resistencia de las placas, que se sabe aplicando la ley de Ohm, que será también la pendiente de la gráfica tomando aquellos puntos por arriba de los

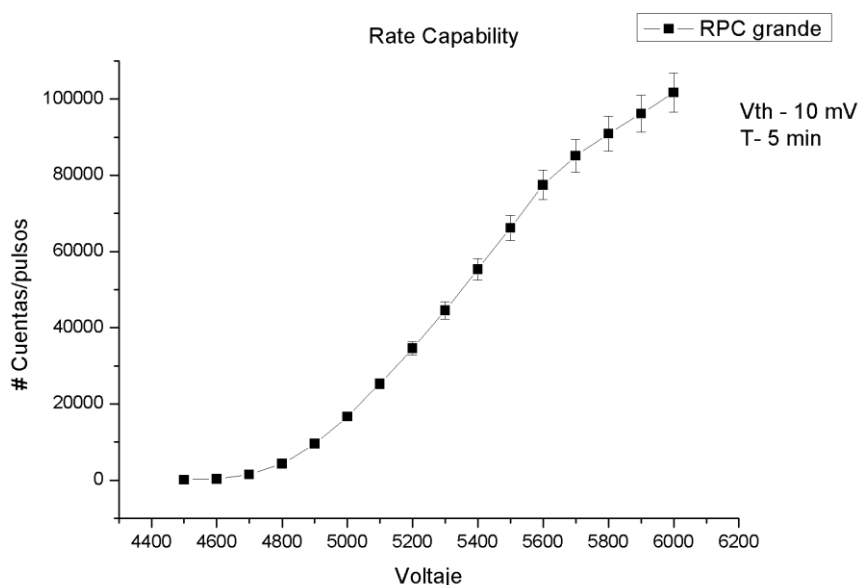
2400 volts. Las dimensiones de la RPC son consideradas, como también el número de gaps. Por otro lado, la resistividad de la pintura es de $5 M\Omega/\blacksquare$. Haciendo el cálculo, tenemos una resistividad de $7.37343 \times 10^{13} \Omega \cdot cm^2$

4.3 RATE CAPABILITY.

Podemos entender el rate capability como la velocidad con que se recarga el detector después que haya ocurrido una descarga. Si la capacidad de velocidad es alta, la pérdida de voltaje es menor. Para medir el rate capability usamos una contadora de eventos diseñada y fabricada en el laboratorio de partículas de la FCFM-BUAP; cuenta los pulsos generados por el detector.

Aplicamos 1000 volts a los dos electrodos del detector y vamos incrementando el voltaje dando pasos de 100 en 100 volts hasta llegar a los 6000 volts en cada electrodo. Para cada incremento de voltaje tomamos lectura del número de eventos registrados por la contadora de eventos y lo hacemos tres veces con cada incremento de voltaje. A continuación, presentamos las gráficas #Eventos vs Voltaje, la primera con un voltaje de discriminación de 15 mV, con un tiempo de 10 min entre cada toma de datos, y la segunda con un tiempo de 5 min:





GRÁFICA 2: RATE CAPABILITY. COMPARACIÓN DEL RATE CAPABILITY DE LA RPC DE 2 GAPS CON OTRA RPC (GRANDE).

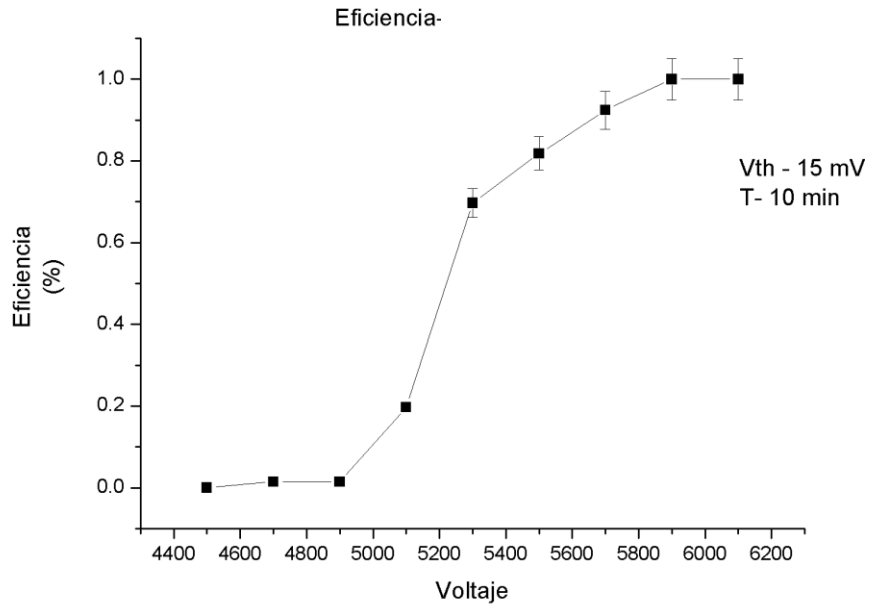
Podemos apreciar que alrededor de 5000 volts el número de cuentas va en aumento. Lo comparamos con una RPC de mayor tamaño, con un voltaje de discriminación de 10 mV y un tiempo de 5 min entre cada toma de datos, en la cual se puede notar que para esta RPC el voltaje es menor para empezar a aumentar el número de cuentas.

4.4 EFICIENCIA

El cálculo de la eficiencia se hace haciendo circular gas freón por el detector, con un consumo de 1 litro/minuto, y variando el voltaje de 5000 a 6000 volts, dando pasos de 100 volts.

Se hace la comparación del comportamiento de la RPC con los PMT's conforme se va incrementando el voltaje.

Alrededor de 4500 volts la eficiencia aumenta hasta llegar a los 6000 volts, en donde no aumenta más, por lo que la eficiencia máxima del detector se encuentra cuando éste opera cerca de los 6000 volts.



GRÁFICA 3: EFICIENCIA

4.5 RESOLUCIÓN TEMPORAL

La resolución temporal mide el tiempo de respuesta del detector. Operamos la RPC en modo avalancha. El arreglo experimental para el cálculo de la resolución temporal es el que se muestra a continuación:

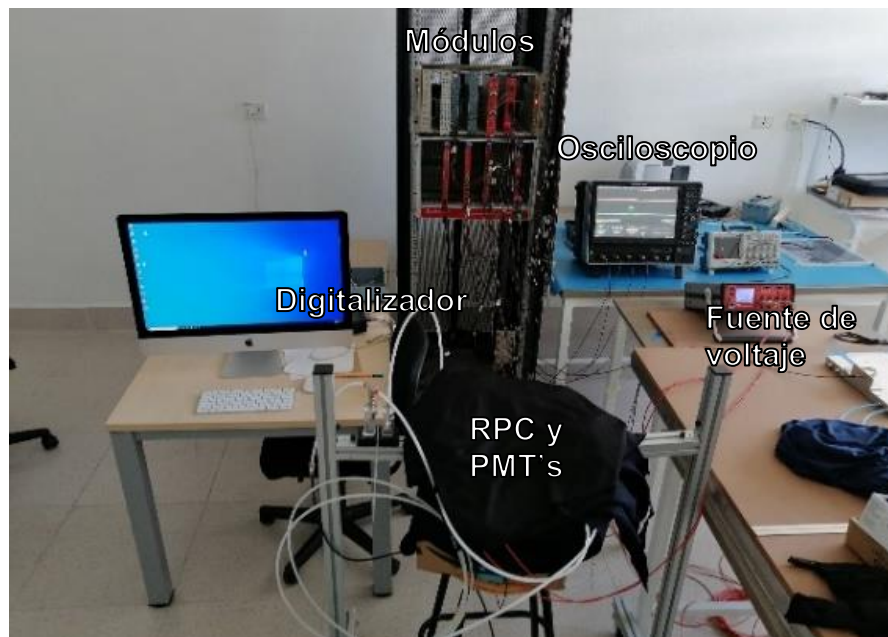
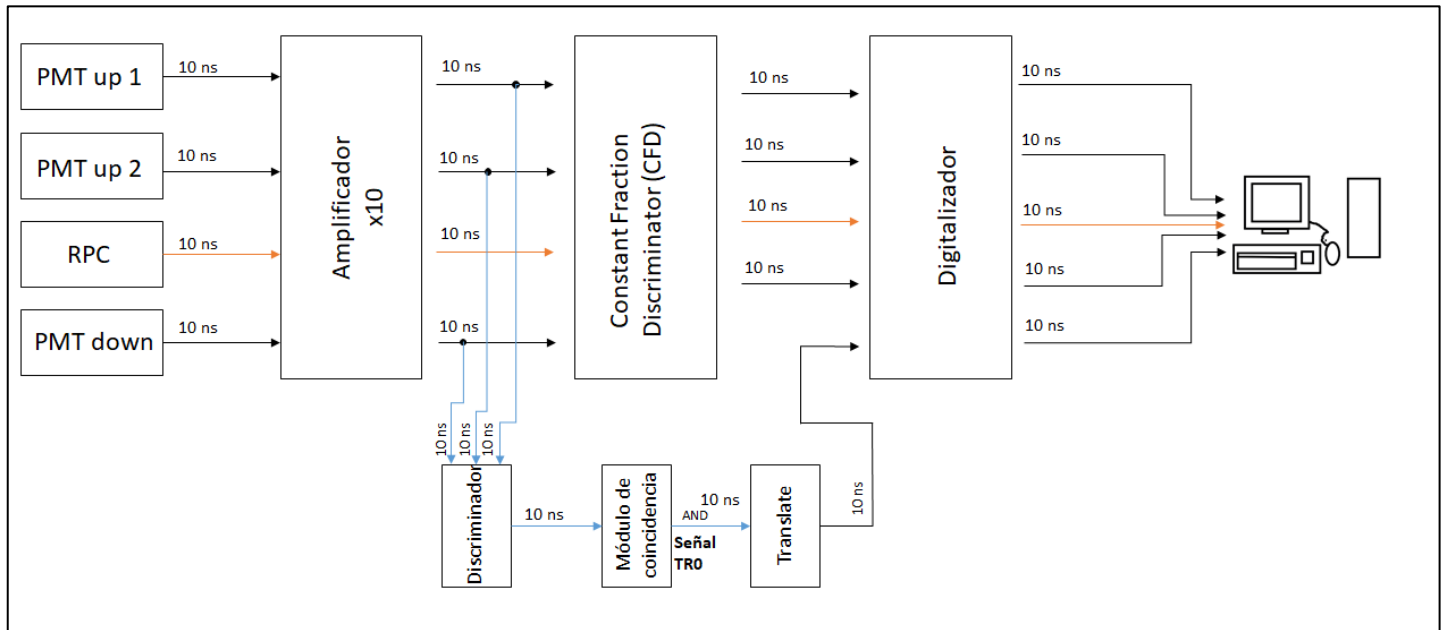


FIGURA 30. ARRIBA: DIAGRAMA DEL ARREGLO EXPERIMENTAL. ABAJO: ARREGLO EXPERIMENTAL.

Como se aprecia en el diagrama del arreglo experimental, las señales de los tres PMT's y de la RPC son amplificadas y filtradas por el módulo "Constant Fraction Discriminator", para ser digitalizadas y ser observadas por medio de una computadora. El Constant Fraction Discriminator pone un valor límite para solo registrar los eventos que pasen por encima de ese valor límite.

Los parámetros de configuración del digitalizador son los siguientes: de los 16 canales que tenemos disponibles usamos CH2 para PTM down, CH4 para PMT up1, CH6 para RPC, CH8 para PMT up2; para la generación del Trigger usamos el canal TR0, el voltaje de discriminación del Trigger se establece a -400 mV con la fuente NIM. La frecuencia de muestro del digitalizador es 5 GS/s y TR0 DC Offset = $0x1000/4096$ para $3V_{pp}$ para TR0. [13]

Aclaremos que el Offset corresponde a una constante (tiempo/amplitud) para alinear toda la toma de datos, ajuste que sirve para tener las señales en la ventana de tiempo determinada y así poder medir el tiempo de forma más precisa.

La señal del Trigger se obtiene a partir de las señales amplificadas de los tubos fotomultiplicadores, las señales amplificadas pasan por un discriminador y luego por un módulo de coincidencia en donde se hace el AND lógico de las tres señales de los PMT's, que será el Trigger (TR0). Por último, la señal pasa por un módulo al que llamamos Translate para luego digitalizar la señal del Trigger y observarla por la PC. En un evento deseado, esperamos ver las señales de los PMT's, de la RPC y del Trigger.

Se operó la RPC en los 5800, 5900, 5950, 6000 y 6050 Volts y se hicieron las distribuciones por cada voltaje de operación. Para obtener las distribuciones se implementó un código programado en C, donde leemos cada 1024 datos, que constituye un evento, determinando si es un evento válido o inválido. Cuando se encuentra un evento válido se guarda el número del dato en donde empieza el evento que nos interesa.

Consideramos como evento válido, aquel cuya secuencia de datos se encuentra con un flanco de bajada en cada señal de los detectores empleados (RPC, PMT's y Trigger), y para encontrarlo primero trabajamos con la señal obtenida del Trigger. Los datos obtenidos rondan alrededor de un valor promedio; cuando una partícula es detectada se manifiesta en la señal digitalizada como un pulso cuadrado que tiene un flanco de bajada y un flanco de subida. Este pulso cuadrado se detecta como una disminución abrupta del valor promedio del conjunto de datos obtenidos, seguido de un continuo de datos con valores similares entre sí, pero mucho menores a los valores iniciales, y por fin un flanco de subida que veremos como un aumento abrupto al valor promedio inicial de la señal. Por ejemplo, de valores oscilantes entre 2500, bajarán repentinamente a valores oscilantes entre 750, se mantendrán un momento para después regresar a los valores iniciales.

Para asegurar que el evento que hemos registrado es válido, se pone la siguiente condición: $i < i + 1 < i + 2 < i + 3 \dots < i + 7$ siendo i el valor inicial después del flanco de bajada. Cuando se cumple la condición se guarda el valor de esa $i + 7$. Así para cada 1024 datos y para el Trigger, los PMT's y la RPC. Con los nuevos valores guardados obtenemos la distribución de las señales contando el número de repeticiones de cada valor.

Graficamos la distribución para cada voltaje y para cada una hacemos un ajuste gaussiano. Las gráficas de las distribuciones junto con sus ajustes se muestran a continuación.

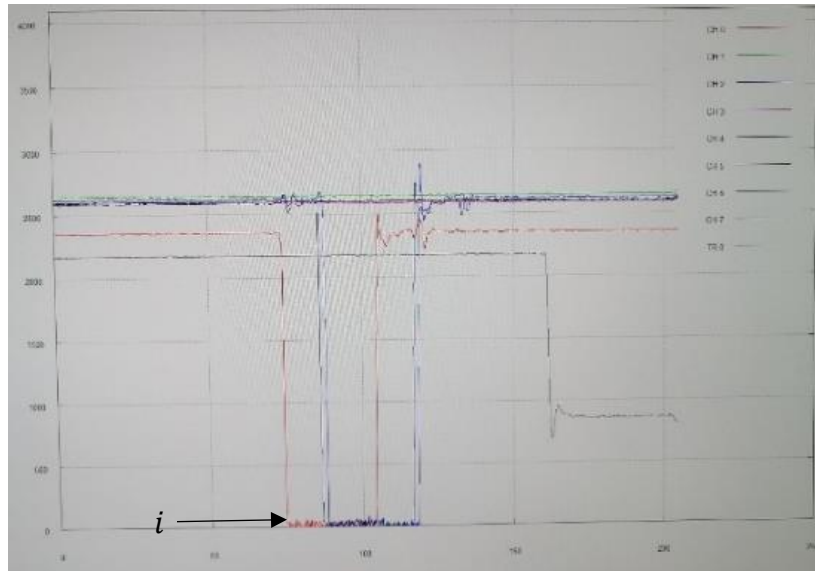


FIGURA 31. PULSOS OBTENIDOS.

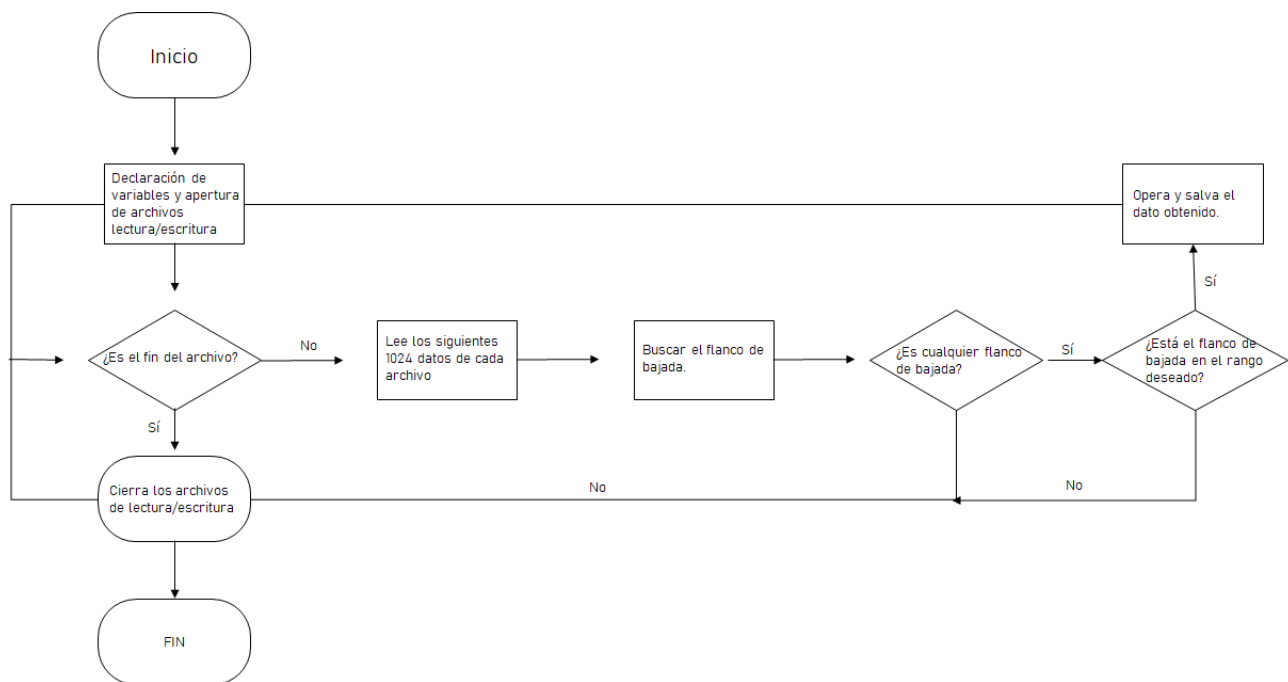
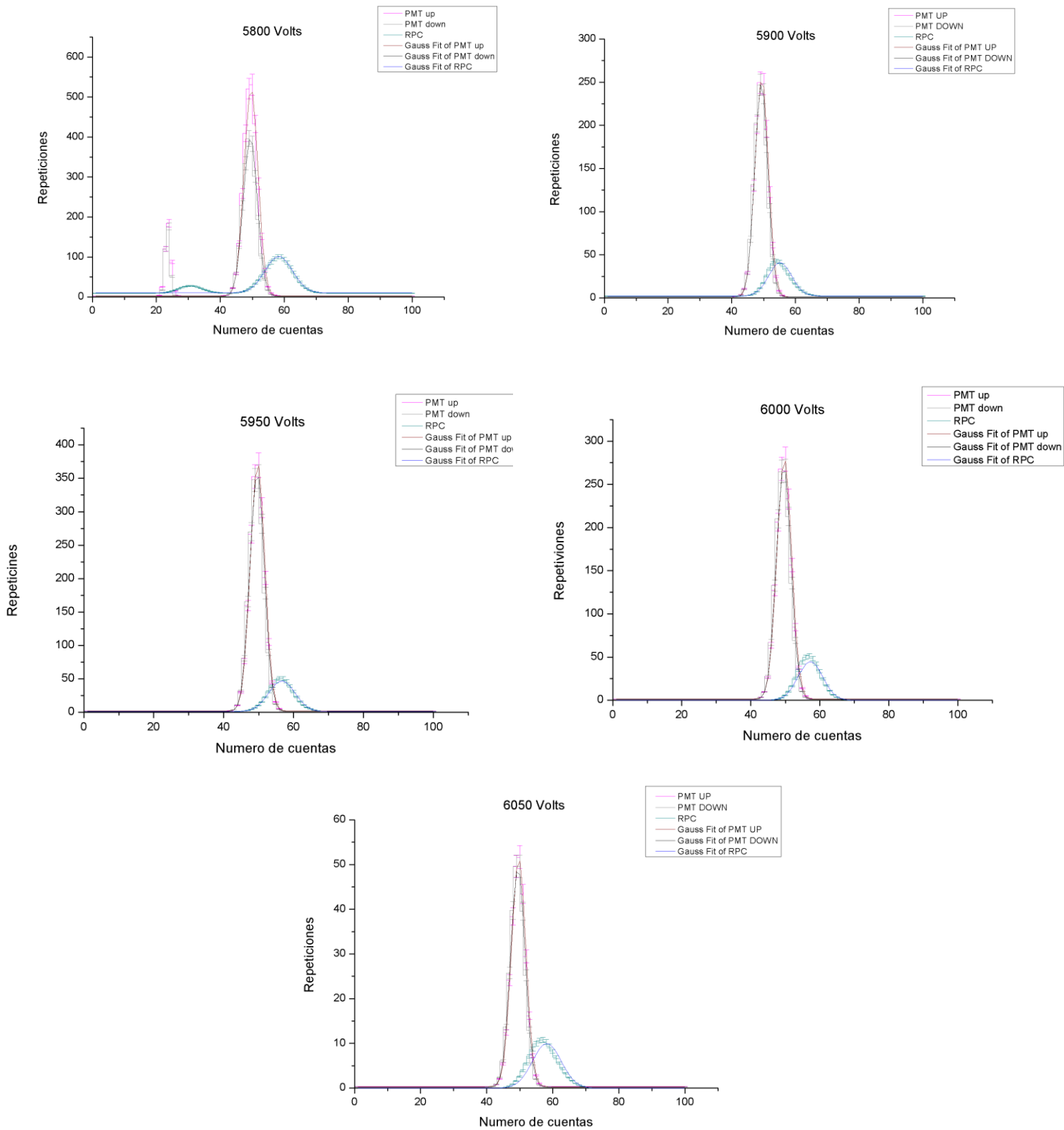


FIGURA 32. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CÓDIGO EMPLEADO.



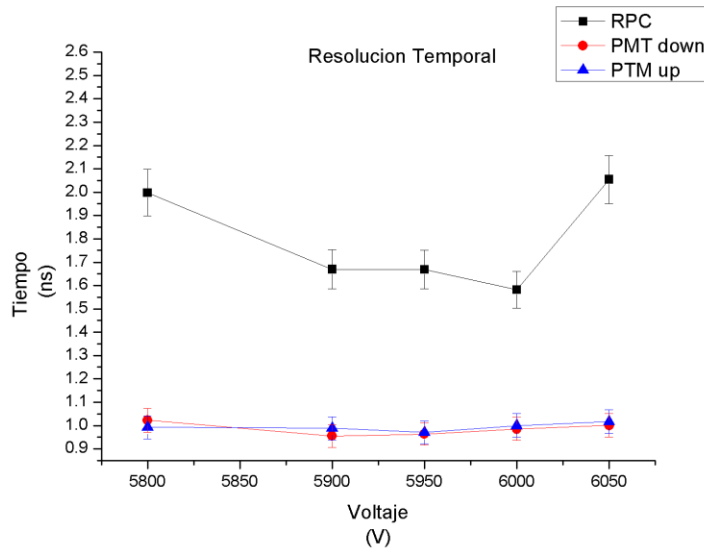
GRÁFICA 4: DISTRIBUCIONES OBTENIDAS A DIFERENTES VOLTAJES.

Midiendo el FWHM se calcula la resolución temporal para cada distribución. Para ello hay que considerar que la distancia entre punto y punto de los pulsos digitalizados equivale a 20 ns. En la siguiente tabla se muestra el valor del FWHM y de la resolución temporal (RT) para cada voltaje, de la RPC y de dos PMT's.

TABLA 1. VALORES DEL FWHM Y DE LA RESOLUCIÓN TEMPORAL CALCULADA.

Voltaje	PMT up		PMT down		RPC	
	FWHM	RT	FWHM	RT	FWHM	RT
5800	4.96141	0.99228	5.11236	1.02247	9.98676	1.99735
5900	4.93999	0.988	4.77669	0.95534	8.34598	1.6692
5950	4.85548	0.9711	4.81904	0.96381	8.34069	1.66814
6000	5.00116	1.00023	4.92611	0.98522	7.90852	1.5817
6050	5.08407	1.01681	5.00462	1.00092	10.27374	2.05475

Haciendo el promedio de la resolución temporal por voltaje, tenemos que la resolución temporal total de nuestro detector es: 1.79423 ns, cuando se encuentra operando entre los 5800 y 6050 volts.



GRÁFICA 5: RESOLUCIÓN TEMPORAL.

CONCLUSIONES

Hemos analizado el tema de los detectores gaseosos de placas resistivas (RPC), en el cual explicamos su funcionamiento y modos de operación. Expusimos el proceso de construcción de un detector RPC con dimensiones de 90 x 1.20 metros, con 2 gaps de 1 mm y vidrio de 2 mm de espesor y mostramos los resultados de su caracterización.

Con un consumo de gas de 1 litro/min y resistividad de pintura de $5 \Omega/\blacksquare$, reportamos una resolución temporal en promedio de 1.79 ns cuando la RPC se encuentra operando entre los 5800 V-5950 V, esta resolución fue calculada midiendo el FWHM de las distribuciones por voltaje que se presentaron. Por otro lado, el análisis de datos, comprueba el correcto funcionamiento del detector, lo cual podemos corroborarlo en las gráficas de eficiencia, con un porcentaje arriba del 90%, y del rate capability, en donde vemos que, a mayor voltaje, mayor número de eventos registrados, lo que significa menor pérdida de voltaje. Se propone que para mejorar el funcionamiento de las cámaras de placas resistivas se debe aumentar en número de gaps y disminuir el ancho de cada gap, de esta manera podemos esperar resoluciones temporales menores a la que reportamos nosotros. Por lo que concientizamos del sumo cuidado que se debe tener en su construcción, ya que, a pesar de no ser difícil, son susceptibles a cualquier residuo de material que quede dentro del arreglo.

En cuanto a las RPC's, entendemos que se trata de una investigación a la que se la ha dado seguimiento a lo largo de varios años con la intención de renovar y mejorar los detectores, por lo que aún el desarrollo de aplicaciones de detectores RPC proporciona al investigador un amplio campo para explorar.

En el campo de medicina, S. Razaghi, S. Saramad y M. Shamsaei [14] en 2018 hicieron una simulación de RPC con vidrio de borosilicato y concluyeron que se pueden utilizar RPC en vez de detectores de centello para estudios de imagen como PET, SPECT y CT; además encontraron la ventaja en el sistema de imágenes PET, que usando RPC es posible descartar fotones dispersos sin necesidad de colimador.

Por otro lado, la construcción versátil de los detectores gaseosos los convierte en grandes candidatos para otras técnicas de obtención de imágenes como lo es muografía, ya que el límite del tamaño de estos está sujeto al tamaño de las placas de vidrio o baquelita.

Se insta a la comunidad científica interesada en detectores de partículas ahondar en la investigación y desarrollo de las Cámaras de Placas Resistivas. Hemos visto que, dado su bajo costo de fabricación, su alta eficiencia y buena resolución temporal, son grandes opciones para sustituir otro tipo de detectores, como lo son tubos fotomultiplicadores y plástico centelleador, impactando en el mantenimiento y costos de equipos basados en la detección de partículas, posiblemente con alcance positivo al servicio común de la sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Santonico and R. Cadarelli, "Development of Resisitive Plate Counters," *Nuc. Inst. and Methods*, vol. 187, pp. 377-380, 1981.
- [2] I. N. Pestov and G. Fedotovich, "Spark Counter with a localized discharge as a new particle detector," *Vsesoiuznaia Konferentsiia po Kosmicheskim Lucham*, vol. 42, pp. 1488-1490, 1978.
- [3] A. Tanarro Sanz, *Detectores de Radiación Nuclear*, Madrid: Junta de Energía Nuclear, 1959.
- [4] P. A. Glória, *Instrumentation and testing of RPC (Resistive Plate Chamber) detectors in the Pierre Auger collaboration*, Lisboa: Técnico Lisboa, 2014.
- [5] R. Karnam, "Design and Characterization of a 2m x 2m," Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, ***.
- [6] D. Régules, *Construcción de un detector gaseoso de placas resistivas*, Puebla: Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, 2019.
- [7] G. Bolívar, "lifeder," 14 Mayo 2019. [Online]. Available: <https://www.lifeder.com/baquelita/>. [Accessed 20 Septiembre 2020].
- [8] S. Vanheule, *Desing of a galss resistive plate chamber for the upgrade of the Compact Muon Selenoid muon system*, Gent, 2013.
- [9] P. Fonte, "Survey of physical modelling in Resistive Plate," *Journal of Instrumetation*, vol. 18 , no. 11, p. 11001, 2013.

- [10] R. Han, Z. Shi and I. Laktineh, "The properties of glass resistive plate chambers made of different glasses," *Journal of Instrumentation*, vol. 9, no. 09, pp. C09009--C09009, 2014.
- [11] M. Del Rio Viera, *Charge studies on Multigap Resistive Plate Chambers*, Puebla: Facultad de Ciencia Físico-Matemáticas, 2020.
- [12] E. Instrumentation, "742 Digitizer Family," Caen SpA, Viareggio, 2020.
- [13] E. Instrumentation, "User Manual UM4270," CAEN SpA, Viareggio, 2020.
- [14] S. S. a. M. S. S. Razaghi, "Simulation study of Resistive Plate Chamber's (RPCs) capability for medical imaging applications," *Journal of Instrumentation*, vol. 14, no. 01, pp. P01024--P01024, 2019.
- [15] J. Repond, "A Calorimeter with Resistive Plate Chambers," Argonne National Laboratory, Virginia, 2009.
- [16] D. Ramos, "Detección y Dosimetría de la Radiación," Servicio de radiofísica y protección radiológica, Santa Lucía.

ANEXO

Haremos mención de una RPC que construimos, de dimensiones de 15 x 15 cm, con cuatro gaps de 0.05 cm, con un vidrio de 0.1 cm. Su construcción procedió de la misma manera que se expuso en el desarrollo de este trabajo.

Muchas de las imágenes presentadas corresponden a esta RPC, para la cual no se terminó su caracterización ya que entró resina a los gaps impidiendo su correcto funcionamiento.

Esta RPC representaría la principal para este estudio, sin embargo, al notar que operaba a voltajes muy altos para su tamaño de descartó su uso.