



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICA
LICENCIATURA EN FÍSICA APLICADA

CONSTRUCCIÓN DE UN DETECTOR GASEOSO DE
PLACAS RESISITIVAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

PRESENTA:
HÉCTOR DAVID RÉGULES MEDEL

ASESORADO POR:
DR. ARTURO FERNÁNDEZ TÉLLEZ
DR. GUILLERMO TEJEDA MUÑOZ

PUEBLA, MÉXICO

JUNIO 2019

A mi familia, por su apoyo incondicional.

Resumen

Las cámaras de placas resistivas (RPC, por sus siglas en inglés) son detectores gaseosos contruidos a partir de capas de materiales con alta resistencia que se encuentran en el rango de 10^7 y 10^{12} Ωcm , con una separación entre cada capa (gap) de 1 mm. En las placas superior e inferior, se construyen los electrodos del detector en donde se aplica un alto voltaje. Estos detectores son usados ampliamente en los experimentos de física de partículas y recientemente en física médica. La detección de los pulsos generados por las partículas cargadas que atraviesan el detector son adquiridos con el arreglo de un electrodo de lectura de forma rectangular (usualmente llamado pad), el cual cubre el área efectiva de detección del RPC.

En el presente trabajo de tesis se involucra el diseño, construcción y caracterización, de un RPC de vidrio con dimensiones finales de 25 cm x 25 cm. Los detalles de la fabricación, operación del RPC construido, incluyendo el sistema de distribución de gases y el sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en ingles), son discutidos aquí.

Finalmente se presentan las características obtenidas del detector construido, como lo son el ruido, resistividad, eficiencia, distribución de carga y resolución temporal del detector.

Índice general

Resumen	III
Introducción	VII
1. Interacción de la radiación	1
1.1. Radiación terrestre - - - - -	2
1.2. Radiación cósmica - - - - -	3
1.2.1. Rayos cósmicos - - - - -	4
1.2.2. Cascadas atmosféricas - - - - -	4
1.2.3. Rayos cósmicos bajo tierra - - - - -	6
1.3. Interacción de la radiación con la materia - - - - -	7
1.3.1. Interacción - - - - -	8
1.3.1.1. Ionización - - - - -	9
1.3.1.2. Efecto fotoeléctrico - - - - -	10
1.3.1.3. Dispersión Compton - - - - -	11
1.3.1.4. Producción de pares - - - - -	13
1.3.2. Detección de la radiación - - - - -	14
1.3.3. Medición de la radiación - - - - -	16
2. Detectores de partículas	17
2.1. Características generales de los detectores - - - - -	18
2.1.1. Sensibilidad - - - - -	18
2.1.2. Respuesta del detector - - - - -	19

2.1.3. Resolución energética	19
2.1.4. Tiempo de respuesta	23
2.1.5. Eficiencia del detector	24
2.1.6. Tiempo muerto	26
2.2. Detectores líquidos	27
2.2.1. Cámara de ionización líquida	27
2.3. Detectores de estado sólido	28
2.3.1. Detectores semiconductores	28
2.3.2. Detectores de centelleo	29
2.4. Detectores gaseosos	30
2.4.1. Cámaras de ionización gaseosas	30
2.4.2. Detector de cámara de placas resistivas	32
2.4.2.1. RPCs de baquelita	33
2.4.2.2. RPCs de vidrio	37
2.4.2.3. Geometría del detector	38
2.4.2.4. Modos de operación	38
2.4.2.4.1. Modo avalancha	38
2.4.2.4.2. Modo streamer	39
2.4.2.5. Mezcla de gases	40
2.4.2.6. Nuevos desarrollos en los RPCs	41
2.4.2.6.1. Multi-gap RPCs	41
2.4.2.6.2. Trigger RPCs	44

2.4.2.6.3. Timing RPCS _ _ _ _ _	44
3. Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas	46
3.1. Diseño del detector _ _ _ _ _	46
3.2. Estructura del detector _ _ _ _ _	47
3.3. Sistema de distribución de gases _ _ _ _ _	51
3.4. Diseño experimental _ _ _ _ _	53
3.4.1. Electrónica para adquisición de datos _ _ _ _ _	57
3.4.1.1. Daughterboard _ _ _ _ _	58
3.4.1.2. Motherboard _ _ _ _ _	60
3.4.1.3. TRB _ _ _ _ _	61
3.4.1.4. Generación de Trigger _ _ _ _ _	62
3.5. Adquisición de datos _ _ _ _ _	64
4. Resultados Experimentales	65
4.1. Resistividad _ _ _ _ _	65
4.2. Eficiencia _ _ _ _ _	67
4.3. Distribución de carga _ _ _ _ _	68
4.4. Resolución temporal _ _ _ _ _	75
5. Conclusiones	83
Bibliografía	84

Introducción

Los experimentos más modernos de física de partículas y física nuclear son caracterizados por su gran complejidad. Para resolver el problema de trabajar con escalas muy pequeñas que son típicas en estos campos, se necesitan equipos muy grandes y sofisticados, como lo son los aceleradores que trabajan a muy altas energías y altas luminosidades, así como detectores de alta resolución y alta eficiencia junto con dispositivos electrónicos analógicos y digitales, que cuenten con la misma resolución y eficiencia para poder manipular las señales y no perder la información que los detectores entregan. Es por ello que se han desarrollado las cámaras de placas resistivas que son detectores gaseosos que son sometidos a altos voltajes (HV), en donde al menos uno de sus electrodos es cubierto con algún material altamente resistivo, para limitar la corriente en el detector, previniendo que haya chispas y descargas permanentes en los gaps. Estos dispositivos se caracterizan por estar hechos de materiales de bajo costo y ser fáciles de construir, también pueden cubrir grandes superficies y alcanzar resoluciones temporales mejores que 50 ps, por esta razón es que han logrado una gran aceptación en áreas como astropartículas, física de altas energías y física nuclear.

Los procesos fundamentales que ocurren en un RPC en operación son bien conocidos: una partícula cargada que atraviese el volumen activo del detector deja carga libre en el gas, la cual es acelerada y multiplicada hacia el ánodo por un apropiado campo eléctrico. La propagación en el gap del número creciente de carga induce una señal en el electrodo de lectura.

El objetivo de este trabajo de tesis es describir el diseño y el proceso de construcción de un detector de cámaras de placas resistivas de doble gap y mostrar los resultados obtenidos al poner a prueba el detector construido.

Capítulo 1

Interacción de la radiación

El fenómeno conocido como radiación se define como la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un material. La radiación que se propaga en forma de ondas electromagnéticas (rayos UV, rayos gamma, rayos x, etc.) se conoce como radiación electromagnética, mientras que la radiación corpuscular es la energía transmitida en forma de partículas subatómicas que se mueven a gran velocidad.

Si la radiación transporta energía suficiente para provocar ionización en el medio incidente, se dice que es una radiación ionizante. En caso contrario se habla de radiación no ionizante. El carácter ionizante o no ionizante de la radiación es independiente de su naturaleza ondulatoria o corpuscular.

La humanidad se ha desarrollado en un ambiente naturalmente radioactivo. Ya que la tierra y los elementos que se encuentran en la naturaleza emiten radiación. La cantidad de radiación proveniente de estas fuentes naturales varía según el lugar geográfico.

Hay dos tipos de fuentes naturales de radiación: cósmica y terrestre. La cantidad de radiación que recibe el cuerpo humano debido a estas fuentes naturales es mínima, y por lo tanto no causa ningún daño medible.

1.1. Radiación terrestre

Este tipo de radiación está presente en pequeñas cantidades en todas partes y no se puede escapar de ella. En cualquier lugar, el agua que bebemos, el aire que respiramos, y la comida que consumimos, todo está contaminado con diminutas cantidades de radiación que emiten isótopos. Aunque estos isótopos, en general, son extremadamente peligrosos, no causan ningún daño apreciable al cuerpo humano excepto cuando están presentes en concentraciones mayores a las normales.

La principal fuente de radiación terrestre es el elemento uranio, y los productos de su decaimiento, como lo son los elementos torio, radio y radón. Aunque la concentración natural total de estos elementos radioactivos está dentro de un rango tolerable para los humanos, se han identificado algunas partes del mundo donde hay niveles más altos de uranio y torio en la superficie, que han aumentado la radiación a niveles peligrosos. Desafortunadamente los seres humanos han contribuido a este problema llevando a cabo explosiones nucleares y derramamiento de desperdicios nucleares.

Los dos isótopos de radón, ^{222}Rn y ^{220}Rn , y el producto de sus decaimientos, son los elementos radioactivos que con mayor frecuencia se encuentran en el entorno. La principal preocupación con estos isótopos emisores de partículas alfa es que sean inhalados o digeridos, en dicho caso las partículas alfa de corto alcance causan daños a los órganos internos y esto puede conducir a algún tipo de cáncer.

1.2. Radiación cósmica

El espacio exterior está lleno de radiación, esta radiación tiene una variedad de fuentes. Por ejemplo, podría ser nuestro Sol o la supernova más cercana. Estos cuerpos producen una inmensa cantidad de radiación, alguna cantidad de radiación es capaz de alcanzar a la tierra. Afortunadamente la atmósfera terrestre actúa como escudo a la parte más dañina de esta radiación, como lo son los rayos ultravioletas que son bloqueados por la capa de ozono. Sin embargo, no toda la radiación dañina es bloqueada y esta puede alcanzar la superficie de la tierra, causando quemaduras en la piel y cáncer en las personas que permanezcan expuestas a la luz del sol por periodos largos de tiempo. La situación es aún peor en lugares donde la capa de ozono se ha reducido por alguna razón.

También hay radiación de fondo, que está compuesta por fotones de baja energía. Se cree que esta radiación es el remanente de lo que conocemos como Big Bang. Se conoce como radiación de fondo de microondas, ya que el espectro de fotones alcanza su punto máximo en la región de microondas del espectro electromagnético. Estos fotones alcanzan la superficie terrestre pero debido a sus bajas energías no son consideradas dañinas.

Aparte de los fotones, hay otras partículas que también son producidas constantemente en el espacio exterior. La mayoría de ellas nunca alcanzan la tierra debido a que su trayectoria se desvía por la acción del campo magnético terrestre. Algunas de las partículas, como los muones, electrones y neutrinos son producidos cuando una partícula cósmica interactúa con los átomos de la atmósfera. Una cascada de estas partículas es producida y es capaz de alcanzar la superficie terrestre pero debido a sus bajas energías y a sus bajas probabilidades de interacción, no representan peligro para el cuerpo humano.

1.2.1. Rayos cósmicos

Hace más de un siglo el físico austriaco Victor Hess elevó tres electrómetros a una altitud de 5300 metros, usando un globo aerostático y encontrando que la tasa de ionización se multiplicaba aproximadamente por cuatro en comparación con la medida a nivel del suelo. Hess descartó al Sol como la fuente de radiación responsable, mediante a un nuevo ascenso en globo aerostático durante un eclipse solar. En 1913-1914 Werner Kolhorster confirmó las primeras observaciones de Hess al medir el incremento de la tasa de ionización a 9 km de altitud.

A esta radiación proveniente del espacio exterior se le conoce ahora como rayos cósmicos, y sigue siendo uno de los temas más importantes de estudio en astrofísica. Cuando un rayo cósmico impacta con la atmósfera de la tierra, el rayo colisionará con un núcleo de la atmósfera produciendo con ello una reacción nuclear que provoca la creación de nuevas partículas. El núcleo incidente o las partículas resultantes de la colisión continuarán viajando a gran velocidad, en su trayecto, nuevamente tendrá a lugar otras colisiones en la que se generarán nuevas partículas, este proceso se repetirá varias veces, lo que se conoce como una cascada atmosférica.

1.2.2. Cascadas atmosféricas

Las cascadas de rayos cósmicos originados por las colisiones de protones o núcleos ultra energéticos en la atmósfera han sido estudiadas mediante extensos arreglos experimentales sobre la superficie de nuestro planeta y bajo de ella. No se tiene información muy clara acerca de cuales son las fuentes de los rayos cósmicos, pero se cree que provienen de la explosión de supernovas, sin embargo, los rayos cósmicos ultra energéticos probablemente provengan de algún lugar fuera de nuestra galaxia. La medición precisa del espectro de energía de los rayos cósmicos puede brindar conocimiento del origen del rayo cósmico y por lo tanto de su mecanismo de aceleración

Un rayo cósmico primario tendrá, en promedio, su primera interacción con un núcleo de aire a 20 kilómetros sobre la superficie terrestre, comenzando una cascada electromagnética y hadrónica. De las partículas generadas en esta cascada, los electrones, muones y neutrinos son las partículas capaces de llegar a la superficie terrestre. A pesar de la corta vida del muon (2 microsegundos), son capaces de llegar a la superficie e incluso muchos metros bajo la tierra debido a que se ven afectados por la dilatación relativista del tiempo, ya que viajan a altas velocidades (cercanas a la velocidad de la luz). Los neutrinos por otro lado poseen una probabilidad de interacción con la materia extremadamente pequeña, por lo que su poder de penetración es tan grande que puede atravesar completamente la tierra.

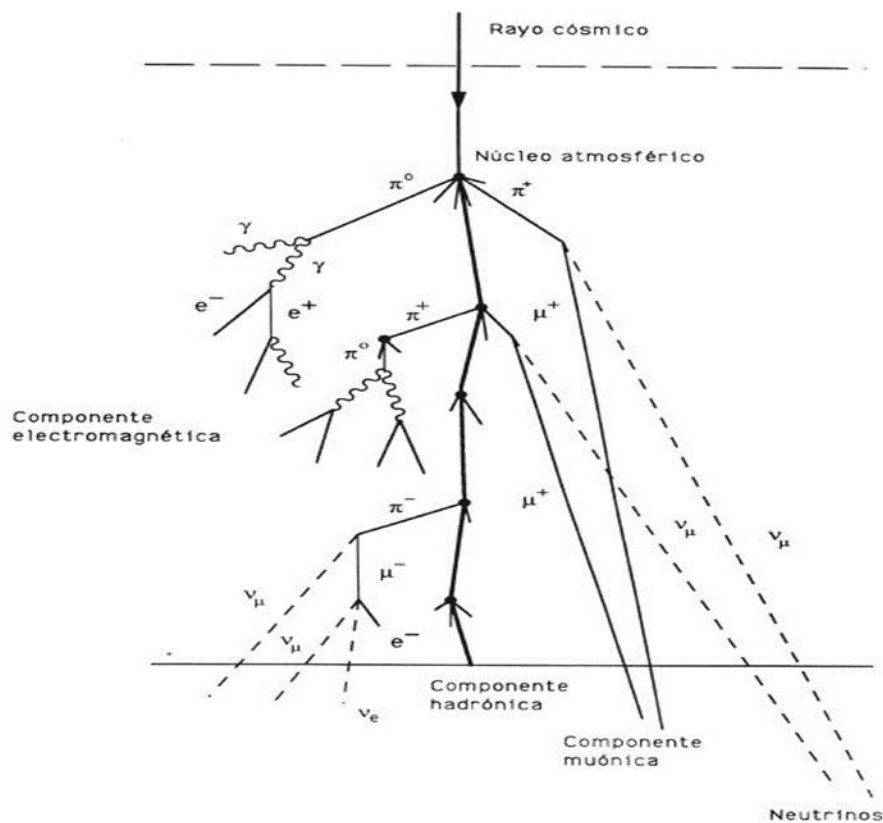


Figura 1.1: Interacción de rayos cósmicos con núcleos atmosféricos.

El muon fue la primera partícula elemental descubierta que no pertenecía a la estructura de los átomos. Algunas características especiales de los muones son:

- Tienen interacciones electromagnéticas débiles con núcleo atómicos, y por ello son capaces de atravesar grandes distancias sin ser absorbidos, es decir, tienen un gran poder de penetración.
- Más de la mitad de la radiación cósmica que llega a la superficie de la tierra está constituida por muones.

1.2.3. Rayos cósmicos bajo tierra

A nivel de la superficie terrestre, la cascada de partículas se puede clasificar en dos partes, una componente electromagnética y una componente muónica. Las partículas que más abundan al nivel del mar son los muones. La mayoría de estos muones se producen a una altura de 15 km y pierden alrededor de 2 GeV debido a la ionización antes de alcanzar la superficie. La componente electromagnética consiste de electrones, protones y fotones, que son producto del decaimiento de mesones cargados y neutros. El decaimiento del muon es la principal fuente de electrones de baja energía al nivel del mar.

En general la componente electromagnética es absorbida cuando atraviesa la superficie terrestre. Solo los muones y neutrinos penetran significativamente profundidades bajo la tierra. ALICE está localizado bajo tierra (bajo 30 metros de roca), y es capaz de detectar muones atmosféricos que provienen de cascadas extensas. A esta profundidad solo muones con energías mayores a 15 GeV pueden alcanzar las zonas de detección.

1.3. Interacción de la radiación con la materia

Cuando se habla de radiación por lo general se piensa en un efecto negativo o destructivo, pero sin darnos cuenta, vivimos en un mundo naturalmente radioactivo, y que la vida sea tal y como la conocemos es gracias a ello. La mayor parte de radiación recibida por la población mundial proviene de fuentes naturales y es inevitable exponerse a ellas.

La materia está constituida por átomos y por grandes agrupaciones de ellos. La estructura de los átomos es un pequeño núcleo formado por protones y neutrones, y orbitando al núcleo se encuentran los electrones. Cuando en un átomo se tiene la misma cantidad de protones y electrones se dice que el átomo es neutro. Si no ocurre esto, el átomo tiene un exceso de carga y se llama ion. En la naturaleza se encuentra que la gran mayoría de núcleos atómicos son estables y se mantienen inalterables con el paso del tiempo. Sin embargo, existen algunos núcleos atómicos que son inestables, en el sentido de que pueden emitir espontáneamente partículas cargadas o radiación electromagnética (fotones), o incluso romperse en varios núcleos más pequeños modificando su identidad.

Una de las características más importantes de la radiación (fotones, neutrones, partículas cargadas, etc.) es la capacidad que tienen de penetrar en la materia e interactuar con ella. Cuando la radiación incide en el material puede ocurrir que la radiación sea absorbida, dispersada o que transite sin ninguna interacción en absoluto. Hay dos formas en las que una partícula que viaja a través de un material pueda perder su energía:

- Gradual: Si la partícula pierde su energía de forma continua debido a las interacciones que sufre al atravesar el medio.
- Total: Si la partícula se mueve sin ninguna interacción en absoluto en el material, hasta que en una sola colisión pierde toda su energía.

La interacción de la radiación con un material determinado depende esencialmente de la carga eléctrica y de la masa de la partícula incidente. Por lo que se necesita distinguir entre:

- Partículas sin carga y sin masa (fotones, es decir: rayos gamma, rayos X, etc.).
- Partículas cargadas “ligeras” (electrones, positrones, etc.)
- Partículas cargadas “pesadas” (protones, muones, etc.)
- Partículas con masa y sin carga (neutrones).

A continuación, se describen los procesos de interacción de las partículas cargadas con la materia, ya que son de interés para este trabajo de tesis.

1.3.1 Interacción

Las partículas cargadas que penetran el material interaccionan con él principalmente a través de la fuerza de Coulomb que hay entre la partícula incidente y las cargas positivas y negativas de los átomos absorbentes. Aunque podría haber interacciones de la partícula con el núcleo, pero que esta interacción ocurra es poco probable y por otro lado, no afecta a la respuesta del detector. La respuesta del detector depende de las interacciones con los electrones del medio.

Cuando entra a cualquier medio absorbente, la partícula inmediatamente interacciona simultáneamente con muchos electrones. En cada uno de estos encuentros, a medida que la partícula pasa por las cercanías del electrón este siente un impulso debido a la fuerza de Coulomb. Dependiendo de la proximidad del encuentro, este impulso puede ser suficiente para que el electrón pase de su estado fundamental a un nivel de energía superior, a este proceso se le llama excitación. O puede ocurrir que el electrón sea removido completamente del átomo, esto se conoce como el proceso de ionización. Debido a que la energía es una cantidad conservada, el proceso de excitación del electrón o la ionización del átomo se ve reflejado en una pérdida de la velocidad de la partícula incidente

La energía máxima que puede ser transferida de la partícula cargada de masa m , con una energía cinética E , a un electrón de masa m_0 en una sola colisión es:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{4Em_0}{m} \quad (1.1)$$

Como la razón de m_0/m para un electrón y un protón es aproximadamente 2000, la energía máxima puede reescribirse como:

$$E_{m\acute{a}x} \sim \frac{E}{500A} \quad (1.2)$$

Donde A es la masa atómica (el número total de nucleones). Conforme la partícula cargada viaja por el material, esta pierde energía poco a poco, es decir, pierde 1/500 de su energía por nucleón y, por lo tanto, pasa por numerosas interacciones antes de perder toda su energía.

1.3.1.1 Ionización

Si la partícula incidente deja suficiente energía en el átomo, puede expulsar uno de sus electrones, dando como resultado la ionización del átomo (ionización primaria). Como se mencionó anteriormente, la energía del electrón expulsado depende de la energía de la partícula incidente. Si el electrón es expulsado con suficiente energía puede producir una ionización secundaria, de la misma forma que la ionización primaria. El proceso puede continuar hasta que la energía del electrón expulsado sea menor que el potencial de ionización del átomo. Este proceso se muestra gráficamente en la figura 1.2. Aunque no todos los electrones que tienen una energía superior que el potencial de ionización del átomo puede producir ionizaciones subsecuentes. La probabilidad con la que un electrón puede causar ionización depende de su sección transversal, que en gran medida depende de su

energía y el tipo de átomo con el que interaccione. Se ha visto que, solo una tercera parte de los electrones pueden provocar una ionización subsecuente.

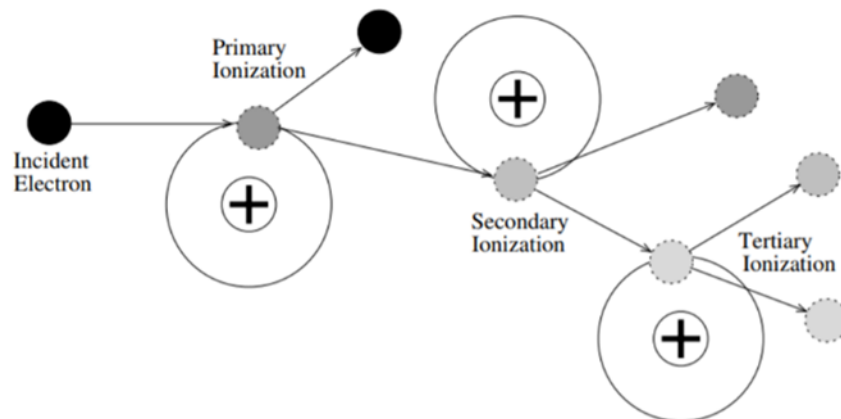


Figura 1.2: Representación de los procesos de ionización inducidos por electrones. En cada etapa de ionización, si el electrón expulsado tiene una energía mayor a la energía de enlace del átomo, puede causar otra ionización.

1.3.1.2. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es la interacción entre un fotón y un electrón orbital que resulta del desprendimiento de un electrón y la desaparición de un fotón. La probabilidad de que el efecto fotoeléctrico ocurra es mayor para los electrones fuertemente unidos. Un electrón se considera unido fuertemente si la energía del fotón incidente es igual a $h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν es la frecuencia. En el efecto fotoeléctrico la energía total del fotón $h\nu$ se transfiere al electrón orbital. La energía cinética es igual a $h\nu - E_B$, donde E_B es la energía de enlace del electrón. Las interacciones pueden ocurrir en cualquiera de las capas del átomo. La energía adquirida por el átomo se considera despreciable debido a su masa tan grande, sin embargo, el átomo adquiere un momento no despreciable durante la interacción. Debido a la discrepancia se la conservación del momento, el electrón involucrado en el efecto fotoeléctrico debe ser considerado como unido y no como electrón libre.

Después de que el electrón ha sido desprendido, se crea una vacancia y el átomo queda en un estado excitado. Como se dijo previamente, uno de los resultados de esa excitación es la emisión de rayos-X característicos. Sin embargo, existe otra alternativa, que es la emisión de electrones Auger. En lugar de emitir un rayo-X característico. El átomo emite un electrón de una de sus capas. La energía que había emitido como rayo-X característico es dada a un electrón que es expulsado. Por ejemplo, si existe una vacancia en la capa K, un electrón de la capa L llenaría esa vacancia, lo cual podría llevar a una emisión de un electrón de la capa M. La energía del fotón emitido está dada por $T_C = E_K - E_L - E_M$. A diferencia de la radiación característica, la energía de los electrones Auger corresponde a las transiciones que están prohibidas en la mecánica cuántica lo cual implica que el efecto Auger no es un efecto fotoeléctrico interno. Un rayo-X característico no sufrirá una interacción de efecto fotoeléctrico en el átomo en el cual el rayo-X fue producido.

1.3.1.3 Dispersión Compton

En la dispersión Compton, el fotón interactúa con un electrón libre. Un electrón se clasifica como libre, si la energía del fotón incidente es mucho mayor que la energía de enlace del electrón en su órbita. El electrón recibe parte de la energía del fotón y es emitido a un ángulo ϕ , mientras que el electrón es dispersado un ángulo θ y con una energía disminuida, esto se ilustra en la figura 1.3.

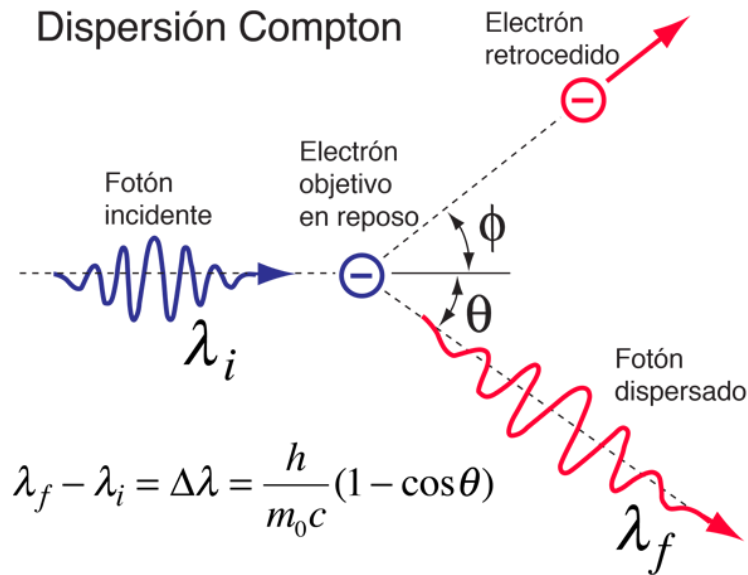


Figura 1.3: Ilustración del efecto Compton.

El proceso Compton se puede analizar en términos de la colisión entre un fotón y un electrón. El análisis de la cinética de esta interacción lleva a las siguientes relaciones:

$$T_e = hv \frac{\epsilon(1 - \cos\theta)}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)} \quad (1.3)$$

$$hv' = \frac{hv}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)} \quad (1.4)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{hc}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta) \quad (1.5)$$

$$\cot\theta = (1 + \epsilon) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.6)$$

Donde $\varepsilon = hv/m_0c^2$ es la energía del fotón normalizada a la masa en reposo del electrón. h es la constante de Planck, T , es la energía cinética del electrón Compton, hv es la energía del fotón incidente. hv' es la energía del fotón dispersado, θ es el ángulo de dispersión de fotón. Φ es el ángulo de dispersión del electrón, λ es la longitud de onda del fotón incidente, λ' es la longitud de onda del fotón dispersado.

Hay algunos casos especiales del efecto Compton que se discutirán brevemente. En el caso en que el fotón colisiona de frente con el electrón, el electrón se moverá en dirección recta ($\varphi = 0^\circ$) mientras que el fotón sufrirá una retrodispersión donde θ es 180° . El electrón recibe una cantidad máxima de energía cinética mientras que el fotón se queda con una cantidad mínima. En el caso contrario, en un golpe al azar el electrón sale dispersado en ángulo recto ($\varphi=90^\circ$) y el fotón dispersado viaja en una dirección recta ($\theta=0^\circ$). El electrón no adquiere energía cinética, mientras que el fotón dispersado no pierde nada de energía. En una colisión al azar, la colisión es elástica.

1.3.1.4 Producción de pares

En la producción de pares, el fotón interacciona con el núcleo atómico. El fotón pierde toda su energía resultando en la formación de un electrón y un positrón. El fotón se absorbe durante el proceso y el núcleo adquiere cierto momento. Sin embargo, sólo los fotones con energías mayores a 1.022 MeV pueden llevar a cabo la producción de pares, ya que el umbral de energía es aproximadamente igual a $2m_0c^2$, donde m_0 es la masa en reposo del electrón, y que tiene un valor de 0.511 MeV/C². En la producción de pares, la energía en exceso del fotón para la energía umbral se comparte por las dos partículas. Las partículas tienden a viajar en dirección recta.

El fotón también puede interaccionar con el campo eléctrico de un electrón orbital. Esto lleva a la formación de un electrón y un positrón, además de la expulsión del electrón orbital de su capa electrónica. Esto crea una vacancia que es seguida

de la emisión de radiación característica o de electrones Auger. Este proceso se llama producción triple, y tiene un umbral de energía de 2.044 MeV ($4m_0c^2$).

1.3.2. Detección de la radiación

Se supone que se tiene un detector el cual está recibiendo algún tipo de radiación. También se supone que solo llega una partícula o un cuanto de radiación al detector, el cual podría ser, una sola partícula alfa o un fotón de rayos gamma. Para que haya una respuesta del detector, la radiación debe experimentar algún tipo de interacción con el detector como las que se describieron en la sección anterior. La interacción dura muy poco (generalmente nanosegundos en gases o unos cuantos picosegundos en sólidos). En la mayoría de las situaciones prácticas, estos tiempos son tan pequeños que se puede considerar que la radiación deposita su energía en el detector de forma instantánea. El resultado neto de la interacción, en la mayoría de los detectores de partículas, es la aparición de una carga eléctrica dentro del volumen activo del detector. En este modelo simplificado de un detector se asume que aparece una carga Q dentro del detector en el momento $t = 0$, resultante de la interacción de una sola partícula o de un solo cuanto de radiación.

A continuación, la carga eléctrica se recolecta para formar la base de una señal eléctrica. Generalmente, esta carga se logra recoger a través de aplicar un campo eléctrico dentro del detector, lo cual provocará que las cargas positivas y negativas generadas por la radiación fluyan en direcciones contrarias. El tiempo de recolección de toda la carga varía de detector a detector. Por ejemplo, en las cámaras de ionización el tiempo para recolectar la carga puede ser unos cuantos milisegundos, mientras que en los diodos semiconductores este proceso dura apenas unos cuantos nanosegundos. Estos tiempos reflejan tanto la movilidad de la carga dentro del volumen activo y la distancia media que se debe recorrer antes de llegar a los electrodos de recolección.

Con este modelo de detector cuya respuesta a una sola partícula será una corriente que fluye por un determinado tiempo que es igual al tiempo en el que se recolecta la carga. El ejemplo puede ser representado por la figura 1.4.

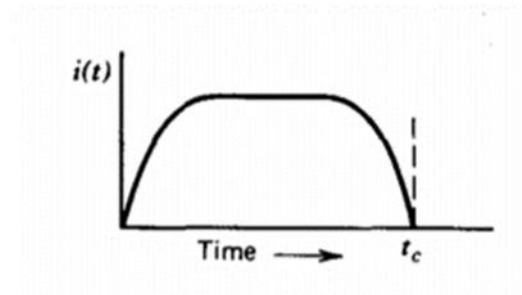


Figura 1.4: Ilustra un ejemplo para la dependencia del tiempo de la corriente que fluye dentro del detector, donde t_c representa el tiempo de recolección de la carga.

En cualquier situación real, muchas partículas interaccionarán en un periodo de tiempo con el detector. Si la tasa de llegada de partículas es alta, puede surgir la situación en la que, la corriente que fluye dentro del detector sea debida a más de una interacción. Para este trabajo se supondrá que la tasa de llegada es lo suficiente baja para que cada interacción genere una corriente que sea distinguible de todas las demás. La magnitud y la duración de cada pulso de corriente puede variar dependiendo del tipo de interacción.

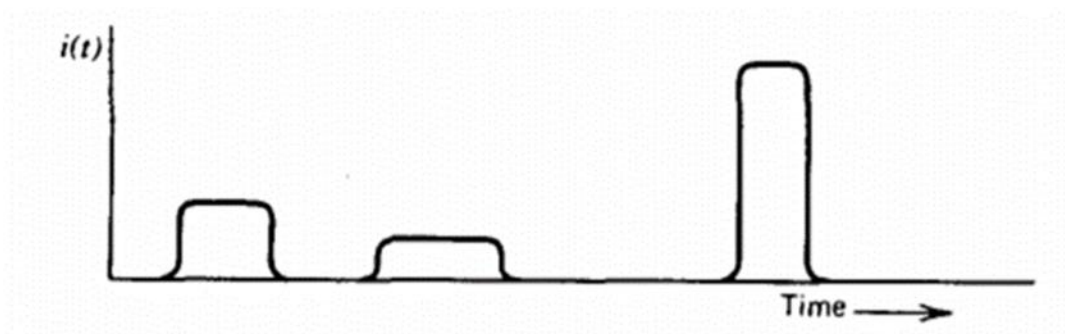


Figura 1.5: Boceto de la corriente instantánea que fluye en el detector, en el que cada interacción genera un pulso distinguible de los demás.

1.3.3. Medición de la radiación

Basándose en los efectos de las partículas al interactuar con la materia se han desarrollado diversos tipos de detectores que permiten realizar medidas cuantitativas de sus trayectorias, tiempo de vida, energía o la identificación de su naturaleza. Por ejemplo, en el experimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment) que es uno de los siete experimentos con detectores en el LHC. Cada detector que conforma ALICE provee de información diferente sobre las partículas producidas por las colisiones que se llevan a cabo en el LHC. Por ejemplo, es necesario conocer cuáles fueron las condiciones iniciales de la colisión, esto se logra detectando las remanentes mediante el calorímetro de nivel cero (ZDC). Los calorímetros pueden medir la energía de las partículas, y determinan si tienen interacciones electromagnéticas o hadrónicas. La identificación de partículas también se puede lograr con un calorímetro, aunque esta medición es destructiva (la partícula deposita toda su energía en el detector). Esto por mencionar ejemplos de mediciones que se pueden obtener y el tipo de detector que se debe utilizar.

Capítulo 2

Detectores de partículas

Durante la historia de la física de partículas y física nuclear se han desarrollado varios tipos de detectores, todos ellos basados en un principio fundamental: transferir toda o parte de la energía de la radiación incidente a la masa del detector, donde se convertirá en otra forma más accesible a la percepción humana. Como se vio en el capítulo anterior, las partículas cargadas transfieren su energía a cierto material a través de colisiones con los electrones atómicos del medio, provocando la excitación o ionización de estos átomos. Por otro lado, para la radiación neutra, primero se debe llevar a cabo una reacción en el detector, produciendo partículas cargadas, las cuales excitarán y ionizarán los átomos del detector. La forma en la que se transforma la energía depende del detector y su diseño. En los detectores gaseosos, por ejemplo, están diseñados para que los electrones generados por la ionización sean directamente recolectados para formar una señal. Mientras que, en los centelladores (detectores sólidos), tanto la excitación y la ionización de los átomos contribuyen a inducir transiciones moleculares las cuales dan como resultado emisión de luz.

Hoy en día los detectores son de naturaleza eléctrica, es decir, en algún punto la información que se genera por las interacciones de la radiación con el detector se transforma en pulsos eléctricos, los cuales pueden ser tratados con medios electrónicos. Esto es posible gracias al gran progreso que se ha hecho en la electrónica y en la computación para proveer de una manipulación rápida y precisa de la información.

A continuación, se definen y se describen algunas características generales de los detectores.

2.1. Características generales de los detectores

2.1.1. Sensibilidad

Lo primero a considerar sobre un detector es su sensibilidad, es decir, la capacidad de producir una señal que pueda ser medida para algún tipo de radiación y cierto valor de energía. Ningún detector es sensible a todos los tipos de radiación. Por ello, son diseñados para ser sensibles a cierto tipo de radiación en un rango de energía. Fuera de esta región los resultados usualmente son una señal inservible o con eficiencia muy reducida.

La sensibilidad del detector para cierto tipo de radiación y un valor dado de energía depende de los siguientes factores:

- La sección transversal para reacciones ionizantes en el detector.
- La masa del detector.
- El ruido inherente del detector.
- El material que cubre el volumen sensible del detector.

La sección transversal y la masa del detector determinan la probabilidad de que la radiación incidente convierta parte o toda su energía en ionización (Se hace la suposición de que las propiedades del detector permiten que la ionización creada sea eficientemente utilizada). Se sabe que las partículas cargadas son altamente ionizantes, por lo que la mayoría de los detectores, incluso de baja densidad y pequeño volumen, podrán producir ionización dentro de su volumen activo de detección. La masa requerida del detector depende del tipo de radiación y el rango de energía de interés.

Aunque la ionización se produzca en el detector, se necesita una cierta cantidad mínima para que la señal sea de utilidad. Este límite inferior se determina por el

2.1. Características generales de los detectores

ruido del detector y su electrónica asociada. El ruido aparece como un voltaje o corriente fluctuante a la salida del detector y siempre está presente, ya sea que haya radiación o no. Obviamente, la señal producida por la ionización debe tener mayor amplitud que el ruido promedio para que sea una útil.

Un último factor limitante es el material con el que se cubre la ventana entrante al volumen sensible del detector. Debido a la absorción, solo la radiación con suficiente energía para penetrar esta capa puede ser detectada. El grosor de este material establece así un límite en la energía que se puede detectar.

2.1.2. Respuesta del detector

Además de detectar la presencia de radiación, la mayoría de los detectores son capaces de dar algún tipo de información sobre la energía de la radiación incidente. Esto debido a que la cantidad de ionización producida por la radiación en el detector es proporcional a la energía que pierde en el volumen activo de detección. Si el detector es lo suficiente largo para que la radiación sea completamente absorbida, entonces la ionización da una medición de la energía de la radiación incidente. Sin embargo, dependiendo del diseño del detector, es posible que esta información no se conserve mientras se procesa la señal.

En general, la señal que se produce a la salida del detector es de la forma de un pulso de corriente eléctrica. La cantidad de ionización se ve reflejada en la carga eléctrica contenida en esta señal, es decir, la integral del pulso con respecto al tiempo. La relación entre la energía de la radiación y la carga total o la amplitud del pulso de salida se conoce como la respuesta del detector.

2.1.4. Resolución energética

Para los detectores que son diseñados para medir la energía de la radiación incidente, el factor más importante es la resolución energética. Es decir, la capacidad que tiene el detector de distinguir entre dos valores de energías

2.1. Características generales de los detectores

cercanos. En general, esta resolución se puede medir mandando un haz monoenergético de radiación al detector y observar el espectro resultante. Lo que se esperaría observar es un pico muy agudo como el de una función delta de Dirac. Realmente, esto nunca ocurrirá, y lo que se observará es un pico con un ancho finito, usualmente con forma gaussiana. El ancho del pico aumenta debido a las fluctuaciones en el número de ionizaciones y excitaciones producidas.

La resolución energética depende de la anchura a media altura (FWHM, por sus siglas en inglés) del pico. Las energías que estén muy cercanas a este intervalo se consideran como indistinguibles. Esto se ilustra en la figura 2.1.

Si nombramos a este ancho como ΔE , entonces la resolución relativa a la energía E es:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (2.1)$$

La ecuación 3.1 usualmente se expresa como porcentaje. Por ejemplo, los detectores *NaI* (detectores de yoduro de sodio) tienen alrededor de 8% o 9% de resolución energética para rayos gamma a energías de 1 MeV, mientras que los detectores de germanio tienen resoluciones del orden de 0.1%.

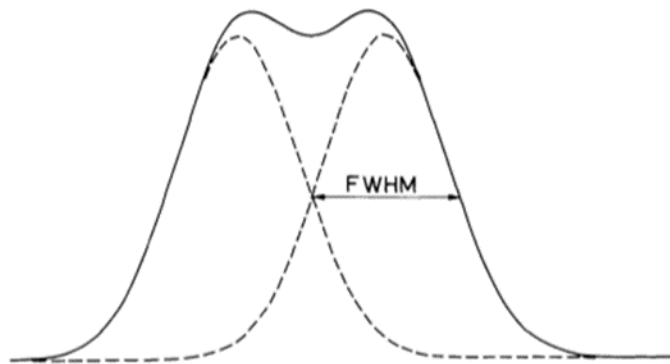


Figura 2.1: Definición de resolución energética. Se consideran como dos picos si estos están separados por una distancia mayor que su FWHM. La línea continua muestra la suma de dos picos gaussianos idénticos que están separados justo por esta cantidad.

2.1. Características generales de los detectores

Se ha encontrado que la energía promedio requerida para producir ionización es un valor fijo, que se denota como w , que depende solo de las características material. Por lo tanto, para una energía E depositada, se espera en promedio, $J = E/w$ ionizaciones. Así, a medida que aumenta la energía, también aumenta el número de eventos que producen ionización dando como resultado fluctuaciones más pequeñas.

Para calcular las fluctuaciones es necesario considerar dos situaciones. La primera, en el que la radiación no es completamente absorbida por el detector, por ejemplo, un detector delgado que solo mide la energía que pierde la partícula conforme atraviesa el detector, es decir, el cambio de la energía con respecto a su posición (dE/dx). El número de interacciones que producen señales esta dado por una distribución de Poisson. La varianza se obtiene de la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = J \quad (2.2)$$

Donde J es el número de ionizaciones producidas. La dependencia energética de la resolución puede entonces verse como:

$$R = 2.35 \frac{\sqrt{J}}{J} = 2.35 \sqrt{\frac{w}{E}} \quad (2.3)$$

Donde la constante 2.35 relaciona la desviación estándar con su FWHM. Por lo tanto, la resolución varía inversamente según la raíz cuadrada de le energía.

La diferencia entre el caso en el que toda la energía de la radiación es absorbida por el detector y el anterior, es que la energía total depositada es un valor fijo, mientras que, en el caso previo, la energía depositada puede fluctuar. El número total de ionizaciones que pueden ocurrir y la energía perdida en cada ionización están limitados por este valor. Estadísticamente hablando, esto significa que los eventos en los que se produzca ionización no son todos independientes, por lo que

la estadística de Poisson no es aplicable. Ugo Fano fue el primero en calcular la varianza bajo esta condición y encontró:

$$\sigma^2 = FJ \quad (2.4)$$

Donde J es la ionización media producida y F es un número conocido como el factor de Fano.

El factor F está en función de todos los diversos procesos fundamentales que pueden conducir a una transferencia de energía al detector, esto incluye también a los procesos que no llevan a la ionización. Es decir, es un valor intrínseco del material. Teóricamente, F es difícil de calcular con precisión, ya que requiere de un conocimiento detallado de todas las reacciones que pueden llevarse a cabo en el detector. De la ecuación 2.4, la resolución está dada por:

$$R = 2.35 \frac{\sqrt{FJ}}{J} = 2.35 \sqrt{\frac{FW}{E}} \quad (2.5)$$

Si ocurre que $F = 1$, se tendrá que la varianza es la misma que para una distribución de Poisson y la ecuación 2.5 se reduce a la ecuación 2.3. Como ocurre para los centelladores, sin embargo, para otro tipo de detectores como los semiconductores o gaseosos, ocurre que $F < 1$. Esto hace que aumente considerablemente la resolución de este tipo de detectores.

2.1.4. Tiempo de respuesta

Una característica muy importante del detector es el tiempo de respuesta. Es decir, el tiempo que le toma al detector formar una señal después de la llegada de cierta radiación. Esto es crucial para las propiedades relacionadas al tiempo del detector. Para una buena medición de este tiempo, es necesario que la señal se forme lo más rápido posible en un pulso estrecho con un flanco de subida muy parecido a una recta vertical.

2.1. Características generales de los detectores

La duración de la señal también es de importancia. Durante este periodo, un segundo evento no puede ser aceptado ya sea porque el detector se encuentra en un estado insensible o porque la segunda señal se acumulará con la primera. Esto contribuye a lo que se conoce como tiempo muerto del detector y limita la tasa de conteo a la que puede operar el detector.

3.1.5. Eficiencia del detector

Hay dos tipos de eficiencia a las cuales se hace referencia cuando se habla de detectores de radiación, eficiencia absoluta y eficiencia de detección intrínseca. La eficiencia absoluta o eficiencia total de un detector se define como el cociente entre los eventos que son registrados por el detector y los eventos emitidos por la fuente, esto es:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\textit{Eventos registrados}}{\textit{Eventos emitidos por la fuente}} \quad (2.6)$$

La eficiencia del detector depende de la geometría del detector y de la probabilidad de interacción en el detector. Como ejemplo, se considera un detector cilíndrico y una fuente puntual a una distancia d sobre el eje del detector como se muestra en la figura 2.2. Si la fuente emite isotrópicamente, entonces, la probabilidad de la partícula sea emitida a un ángulo θ es:

$$P(\theta)d\Omega = \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (2.7)$$

La probabilidad de que una partícula que penetre en el detector interaccione con el medio está dada por la siguiente expresión:

$$P_{int}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (2.8)$$

Donde x es la longitud de la trayectoria de la partícula en el detector, $P_{int}(x)$ es la probabilidad de sufrir una interacción en cualquier parte a una distancia x y λ es el camino libre medio. Combinando la ecuación 3.7 y 3.8 se tiene que:

$$d\epsilon_{tot} = \left[1 - \exp\left(\frac{-x}{\lambda}\right)\right] \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (2.9)$$

La eficiencia total se obtiene integrando la ecuación 3.9 sobre todo el volumen del detector.

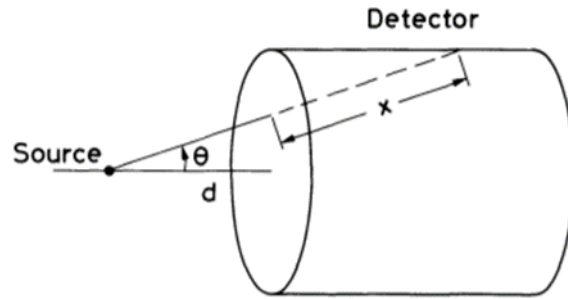


Figura 2.2: Cálculo de la eficiencia de un detector cilíndrico para una fuente puntual.

Sin embargo, en muchos casos, el valor de λ es tan pequeño que el exponencial se puede considerar como cero. Debido a esto la eficiencia absoluta se puede factorizar en dos partes: la eficiencia intrínseca, ϵ_{int} , y eficiencia geométrica o aceptación, ϵ_{geom} . La eficiencia total o absoluta del detector está dada por el producto:

$$\epsilon_{tot} \simeq \epsilon_{int} \epsilon_{geom} \quad (2.10)$$

La eficiencia intrínseca es el cociente entre los eventos registrados entre los eventos que inciden en el detector, esto es:

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{Eventos registrados}}{\text{Eventos incidentes en el detector}} \quad (2.11)$$

2.1. Características generales de los detectores

Esta probabilidad depende de la sección transversal de la interacción de la radiación incidente con el medio detector. Por lo tanto, la eficiencia intrínseca depende del tipo de radiación, su energía y el material del detector. Para partículas cargadas, la eficiencia intrínseca generalmente es buena para la mayoría de los detectores, ya que es raro que una partícula cargada no produzca ionización.

En cambio, la eficiencia geométrica es el cociente entre la cantidad de radiación emitida por la fuente y la cantidad de radiación que es interceptada geoméricamente por el detector. Esto, obviamente, depende completamente de la configuración geométrica del detector y la fuente. Aunque la distribución angular de la radiación incidente también debe ser considerada. Para el detector cilíndrico en la figura 2.2, ϵ_{geom} simplemente es el promedio del ángulo subtendido por el detector hacia la fuente. Para sistemas compuestos por varios detectores, donde se imponen requerimientos de coincidencias entre los detectores, los cálculos se vuelven más complicados y debe recurrirse a la simulación con métodos de Monte Carlo.

2.1.6 Tiempo muerto

Relacionado a la eficiencia del detector está el tiempo muerto. Esto es el tiempo que requiere el detector para procesar un evento, el cual usualmente está relacionado con la duración de la señal del pulso. Dependiendo del tipo, el detector puede permanecer o no sensible a otros eventos durante este periodo. Si el detector permanece insensible, cualquier evento que suceda durante este periodo se perderá. Si el detector mantiene esa sensibilidad, entonces, los eventos se acumularán con el primero dando como resultado una señal distorsionada y en una pérdida de información de ambos eventos. Esta pérdida afecta la tasa de conteo observada y distorsiona la distribución de tiempo de los eventos. Una forma de evitar los efectos del tiempo muerto se logra manteniendo la tasa de conteo lo suficientemente baja para que la probabilidad de que ocurra un segundo evento durante el periodo del tiempo muerto sea mínima.

2.2 Detectores líquidos

No hay razón por la cual un líquido no pueda ser utilizado como medio para la detección de radiación. Cuando la radiación atraviesa un líquido, se producen pares ion-electrón, los cuales pueden ser directamente llevados a los electrodos para la generación de un pulso. Si el líquido garantiza una buena proporcionalidad entre la energía depositada por la radiación y el número de ion-electrón generados, la amplitud del pulso podría ser una buena medición de la energía depositada. Resulta que, existen ciertos líquidos que gozan de esta propiedad, tienen una buena proporcionalidad y por ello pueden ser utilizados como medio de detección.

También hay una clase de detectores, llamados líquidos centelladores, en los cuales el líquido produce luz cuando sus moléculas son excitadas por algún tipo de radiación que incide en él líquido.

2.2.1. Cámaras de ionización líquida

En la mayoría de estos detectores, el volumen de detección está lleno de algún gas noble en estado líquido, como líquido de argón. Las cámaras de ionización líquida tienen características muy favorables, algunas de las cuales se mencionan a continuación:

- Estabilidad: La cámara de ionización líquida es más estable durante un periodo de tiempo más largo comparado con, por ejemplo, los contadores proporcionales. La razón principal de esto es que el líquido se degrada menos con el paso del tiempo.
- Proporcionalidad: La señal de corriente generada por la cámara de ionización líquida es directamente proporcional a la energía depositada por la radiación incidente.

El principio básico de operación de estos detectores es el mismo que las cámaras de ionización gaseosas. En su forma más simple, un recipiente sellado con dos electrodos se llena con un líquido adecuado. La radiación incidente produce

pares ion-electrón, los cuales se mueven en direcciones contrarias cuando se aplica un campo eléctrico entre los electrodos. A continuación, el pulso de se mide en el ánodo.

2.3 Detectores de estado sólido

2.3.1. Detectores semiconductores

Los detectores de estado sólido generalmente están hechos de materiales semiconductores. Los semiconductores son sólidos cristalinos en los cuales sus átomos se mantienen unidos por enlaces covalentes. Se llaman semiconductores porque sus propiedades de conducción eléctrica se encuentran entre las de los materiales aislantes y conductores. Germanio (Ge) y silicio (Si) son los dos materiales semiconductores más utilizados, aunque, hasta ahora, la mayoría de los detectores semiconductores están hechos de silicio. Estos dispositivos son considerados como los primeros detectores con alta resolución para medir energías, esto hizo que fueran adoptados rápidamente en la investigación de física nuclear, para la detección de partículas cargadas y en la espectroscopía de rayos gamma. En años recientes, los detectores semiconductores son muy utilizados en el área de física de altas energías, ya que se consideran también como detectores de alta resolución para la identificación de las trazas de las partículas.

El principio básico de operación de un detector semiconductor es análogo al de las cámaras de ionización. El volumen activo de detección es un material sólido semiconductor. Cuando cierta radiación ionizante penetra en el material se crean pares electrón-hueco (en lugar de pares ion-electrón). Cuando se aplica un campo eléctrico, los dos portadores de carga (el electrón y el hueco) fluirán y producirán una señal. Por lo tanto, el paso de una partícula ionizante puede detectarse recogiendo los portadores de carga liberados por la energía depositada en el material semiconductor. La ventaja de utilizar detectores semiconductores es que la energía promedio para crear un par electrón-hueco es diez veces más pequeña que

la requerida para ionizar un gas. Por ello la cantidad de ionización producida por cierta cantidad de energía es un orden de magnitud más grande dando como resultado una mejora en la resolución de energía. Además, debido a que tienen una gran densidad, la radiación no puede penetrar tanto como lo haría en un detector gaseoso. Tienen un tamaño compacto y pueden llegar a tener tiempos rápidos de respuesta.

2.3.2. Detectores de centelleo

La conversión de la energía depositada por la radiación en fotones sirve para la detección de partículas, determinación de la energía y la discriminación entre partículas con diferentes masas. Por tal motivo, el uso de materiales centelladores es de gran utilidad en muchos campos, tales como la física de altas energías o en la obtención de imágenes médicas.

Los centelladores son materiales que absorben parte de la energía transportada por la radiación incidente y la transforma en fotones detectables (luz visible o casi visible), para después convertirlos en una señal eléctrica. Los centelladores pueden emitir luz de dos tipos, fluorescente y fosforescente. La fluorescencia corresponde a la emisión de luz inmediata ($ns \rightarrow \mu s$) en el rango de longitud de onda visible y es independiente de la temperatura. La fosforescencia corresponde a la emisión de luz durante un periodo de tiempo más largo ($\mu s \rightarrow ms$, incluso horas) con longitudes de onda más largas en comparación con la fluorescencia y depende de la temperatura. En la práctica, solo la fluorescencia (que se caracteriza por la emisión rápida de luz), es útil para la detección de partículas o radiación nuclear.

2.4 Detectores gaseosos

2.4.1 Cámaras de ionización gaseosas

Históricamente, el primer detector gaseoso usado en mediciones experimentales a principios del siglo pasado fue la llamada cámara de ionización. Este detector puede tener diferentes geometrías (la cual depende de las necesidades del experimento), puede ser una geometría plana, cilíndrica, esférica, etc. Sin embargo, su principio de operación es independiente de la geometría.

En la figura 2.3, se muestra esquemáticamente una cámara de ionización plana y cilíndrica. Las cámaras de ionización consisten en dos electrodos metálicos: un ánodo y un cátodo, entre los cuales se aplica un voltaje adecuado. Estos detectores pueden operar llenos de distintos gases (incluyendo aire), comúnmente a presiones de una atmósfera. Las cámaras de ionización se siguen utilizando hoy en día, incluso fuera el campo de física de altas energías, por ejemplo, en detectores de humo, y en su mayoría en aplicaciones de dosimetría.

Si un flujo intenso de radiación ionizante (como puede ser, rayos x, rayos gamma o partículas cargadas, los cuales producen en el gas un cierto número de pares ion-electrón), inciden en la región que se encuentra entre los electrodos, la corriente resultante, medida en función del voltaje aplicado, se verá como se muestra en la figura 2.4. A bajos voltajes (aproximadamente por debajo de 1 kV, dependiendo de la geometría del detector y del gas utilizado), la corriente irá aumentando hasta alcanzar una especie de región de saturación, usualmente llamada "plateau." En esta región, prácticamente todos los pares ion-electrón primarios producidos por la radiación ionizante son recolectados en los electrodos. Para voltajes debajo de la región del plateau, algunos pares ion-electrón se recombinan, y esta es la razón por la cual la corriente recolectada es menor que el valor de saturación.

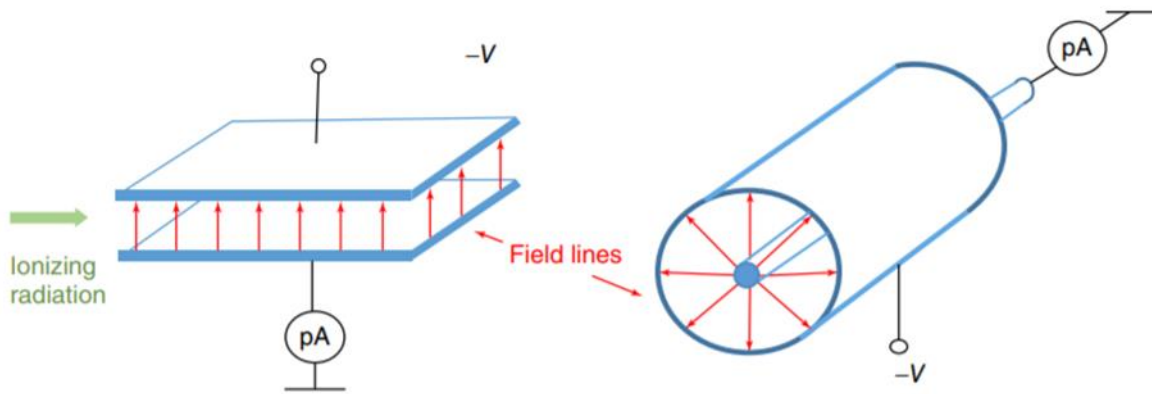


Figura 2.3: Esquemático de una cámara de ionización plana y cilíndrica; “pA” es un pico-amperímetro, es decir, un dispositivo que se utiliza para medir cantidades muy pequeñas de corriente eléctrica.

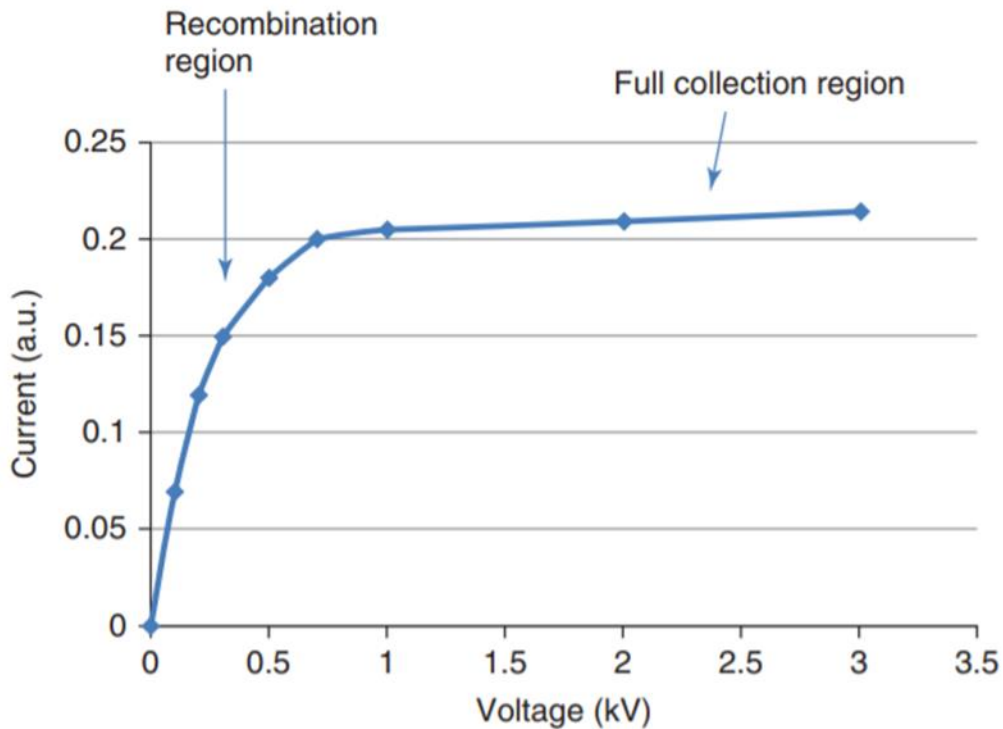


Figura 2.4: Curva típica de la corriente contra el voltaje aplicado. Esta gráfica se obtuvo con una cámara de ionización, que fue irradiada por un flujo de partículas cargadas.

El valor de la corriente en la región del plateau está dada por la expresión:

$$I = K_i \frac{W_{dep}}{W_i} \quad (2.12)$$

Donde K_i es un coeficiente, W_{dep} es la energía depositada por la radiación ionizante dentro del volumen de la cámara de ionización, y W_i es la energía promedio requerida para crear un solo par ion-electrón.

2.4.2. Detector de cámaras de placas resistivas

En esta sección se considera a detalle la versión más antigua del detector de cámara de placas resistivas (RPC, por sus siglas en inglés), el cual consiste de un solo gap (espacio de separación entre las placas resistivas, por el cual el gas circula). Se utilizará este dispositivo “sencillo” para estudiar los fenómenos básicos que ocurren en un RPC, como lo son sus modos de operación. El material que se presenta en esta sección constituye el conocimiento necesario para entender diseños más complicados de RPCs, como RPCs de doble gap o multigap, así como RPCs para timing, los cuales se verán en secciones posteriores.

Al principio de los años 80, Rinaldo Santonico y Roberto Cardelli construyeron en Roma los primeros prototipos del RPC moderno, utilizando laminado fenólico comprimido a alta presión como placas resistivas.

Estos autores reunieron creativamente las siguientes ideas básicas del RPC moderno:

- Geometría plana (mejorando la resolución temporal del detector).
- Es un detector que opera continuamente (no necesita de pulsos de alto voltaje).
- Uso de materiales altamente resistivos como electrodos (Esto con el fin de prevenir chispas o descargas continuas en el gap, es decir, limita la corriente).

- La idea de producir detectores que se pueden construir fácilmente, con el fin de cubrir grandes superficies.

2.4.2.1. RPCs de baquelita

Santonico y Cardelli tuvieron la idea de utilizar un material que no se había utilizado antes como electrodos, la resina de baquelita, la cual es una resina fenólica formada a partir de una reacción de condensación de fenol con un formaldehído. La resina de baquelita se utiliza con frecuencia para la creación de materiales laminares fenólicos. Una lámina fenólica es un material denso y duro que se obtiene al aplicar calor y presión a capas de papel o de vidrio, estas capas impregnadas con resina fenólica. Las láminas fenólicas de baquelita se pueden producir utilizando diversos aditivos para cumplir con diversos requisitos mecánicos, eléctricos y térmicos. Algunos de estos laminados a alta presión se usaron para construir los primeros prototipos de RPCs de Santonico y Cardelli.

En el lenguaje moderno de los RPCs, el material utilizado para construir estos detectores se conoce simplemente como “baquelita” y estos dispositivos como RPCs de baquelita.

El diseño del prototipo original del RPC se muestra en la figura 2.5, y se explica de manera más esquemática en la figura 2.6. Las dos placas paralelas de baquelita de 2 mm de espesor (que funcionan como electrodos), están caracterizadas por tener una resistividad en el rango de $10^{10} - 10^{12} \Omega \text{ cm}$, a las cuales se les aplicó una diferencia de potencial de entre 7 kV-10 kV, esta diferencia de potencial creó un campo eléctrico uniforme en la región intermedia de 2 mm de espesor (generalmente llamado espacio de gas o gap gas).

Los dos electrodos de baquelita fueron sellados lateralmente por un marco de cloruro de polivinilo (PVC), el cual es un buen dieléctrico. La distancia entre las dos placas se garantizó que fuera constante utilizando una serie de espaciadores en forma de botón (100 espaciadores por metro cuadrado) construidos con una precisión de alrededor de 0.10 mm, los cuales están pegados a las placas. Esto les permitió construir una estructura lo suficiente rígida. En la parte intermedia de esta

estructura se encuentra la mezcla de gases, la cual también se conoce como la región activa del detector, la mezcla de gases fluye a través de cuatro orificios que se encuentran en lados opuestos del marco de PVC. En la figura 2.7 se muestra una vista detallada de un RPC de un solo gap.

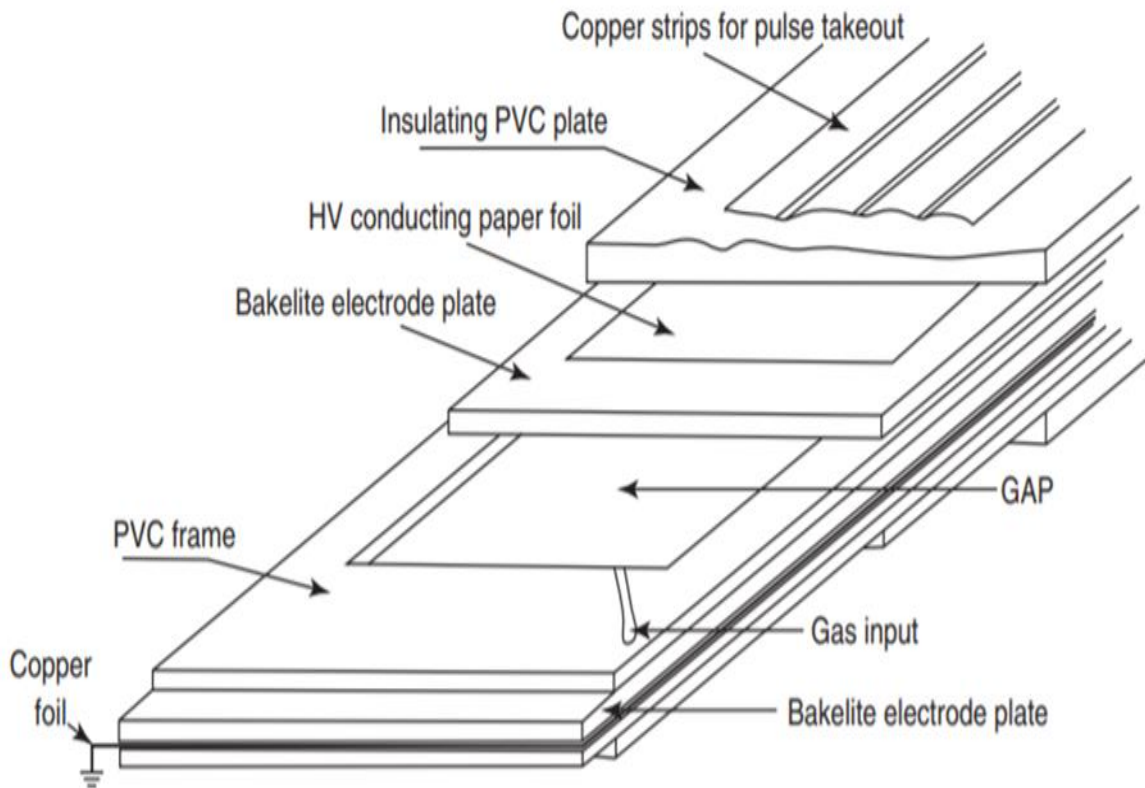


Figura 2.5: Diseño del RPC original.

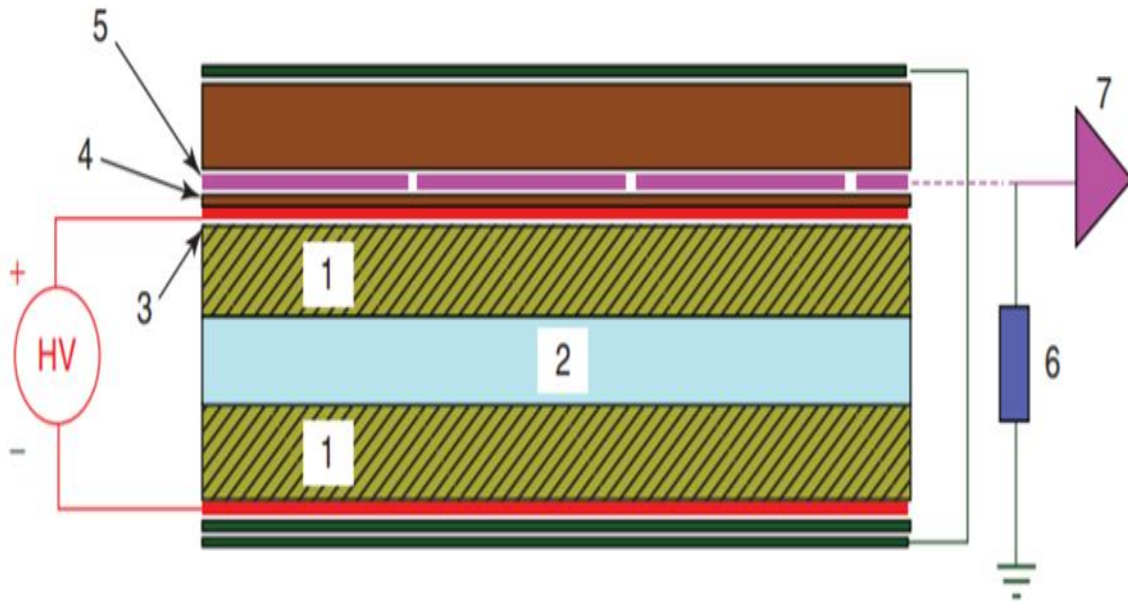


Figura 2.6: Esquemático del RPC de Santonico y Cardelli. (1) Electrodo de baquelita de 2 mm, (2) Espacio de gas de 2 mm, (3) Electrodo de alto voltaje, 200 μm de grafito, (4) Aislante de Mylar, 50 μm , (5) tiras para recolectar la señal de salida, (6) resistencia, (7) electrónica para lectura de la señal de salida.

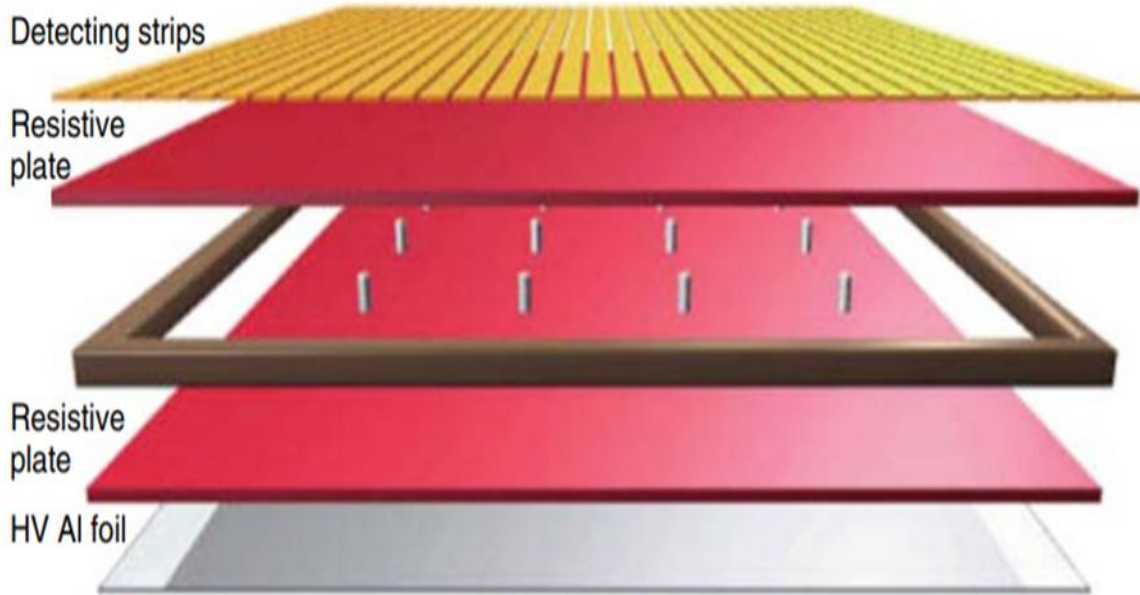


Figura 2.7: Vista detallada de una cámara de placas resistivas.

La superficie de las placas de baquelita que están en contacto con el gas, inevitablemente, tienen desigualdades a nivel microscópico. Cualquier punto sobresaliente en la superficie del electrodo provocará un campo eléctrico local mucho más intenso, aumentando la probabilidad de que ocurra una descarga local. Por lo tanto, Santonico y Cardelli lograron electrodos más lisos al recubrir las superficies internas con una pintura hecha con aceite de linaza diluida en pentano. Este proceso de pintado asegura una reducción significativa en la tasa de “cuentas oscuras”, esto es, los eventos que ve el detector cuando no hay radiación externa incidiendo en el RPC.

Al principio, la mezcla de gases utilizada estaba compuesta de argón, butano, y de algún tipo de clorofluorocarbono (comúnmente llamado “Freón”) a presión atmosférica. Pero, al final se terminó utilizando argón en un 60% y 70%, más 30%-40% de butano y un porcentaje bajo de CF_3Br (bromotrifluorometano). En este caso, el argón, caracterizado por una ionización específica elevada (aproximadamente 26.4 eV/par ion-electrón), constituyó la “parte activa” de la mezcla de gases.

El campo eléctrico en el espacio de gas fue creado, en los primeros prototipos, colocando en el lado externo de uno de los electrodos de baquelita, una lámina de cobre, de 50 μm de espesor; el otro electrodo se conectó al alto voltaje, también en su lado exterior, utilizando una capa de papel conductor. Más adelante, el cobre y el papel conductor no se utilizarían, y las placas de baquelita se recubrirían con capas delgadas de una pintura conductora, hecha con grafito, que tiene como característica principal una resistividad superficial en el rango de 200-300 $\text{k}\Omega/\square$. Para garantizar el aislamiento entre los electrodos y las tiras de lectura, se utiliza una capa de mylar o polietileno de 0.2 mm-0.3 mm de espesor, pegada en la capa de grafito.

El rendimiento de los primeros prototipos de RPC fue muy prometedor, ya que la eficiencia alcanzada era de casi del 100% y la resolución temporal estaba alrededor de 1 ns, esto para rayos cósmicos, con plásticos centelladores que se encontraban por encima y por debajo de la RPC bajo prueba, que funcionaron como trigger.

Hay que tener en cuenta que estos detectores tienen la característica de que cuando se utilizan por primera vez, pueden entregar señales con valores altos de corriente y una tasa alta de conteo, estos valores disminuyen, comúnmente en uno o dos órdenes de magnitud, al mantener el detector en operación, durante un periodo de tiempo que puede variar desde unos pocos días hasta un par de semanas. A esta serie de pasos a menudo se conoce con la palabra “acondicionamiento”. A veces, el proceso de acondicionamiento se realiza llenando el espacio de gas con argón puro, ya que se ha observado que esto da resultados más rápidos y efectivos. Lo que se piensa es que esta disminución progresiva de la corriente y en la tasa de conteo se debe a la suciedad o a pequeñas partículas de polvo dentro del gap, los cuales al principio constituyen puntos localizados donde ocurren las descargas.

La lectura de la señal de salida se puede realizar de uno o de ambos lados del detector. Como los electrodos de lectura son independientes del alto voltaje pueden tener cualquier forma y dimensión. Uno de los arreglos más comunes es el siguiente: se utilizan dos grupos de tiras, una perpendicular a la otra, colocadas en lados opuestos de la RPC, con este arreglo se puede medir al mismo tiempo las dos coordenadas cartesianas del punto de impacto de la partícula ionizante. Otro arreglo frecuente, consiste en usar una serie de electrodos de lectura rectangulares (usualmente llamados “pads”), de unos cuantos centímetros de dimensión.

2.4.2.2. RPCs de vidrio

Desde que se propuso el diseño original del RPC, que data de principios de los años 80, se han llevado a cabo varias mejoras a este detector. Una de esas mejoras es el cambio de los electrodos de baquelita por electrodos hechos de vidrio.

A principios de los años 90 se probaron RPCs hechos con electrodos de melamina y celulosa, pero sin ninguna mejora notable en su desempeño, se debe tener en cuenta que las placas de baquelita comúnmente se producen con una capa delgada de melamina en la parte superior, para obtener una superficie más lisa. Estos intentos demostraron que, en principio, se pueden utilizar diferentes materiales con alta resistividad en el diseño y construcción de la RPC.

Mejores resultados se lograron con la implementación de electrodos hechos de vidrio común (un material no distinto al que se utiliza para ventanas). Estas RPCs ofrecen mejor rigidez, además, a nivel microscópico la superficie del vidrio suele ser más lisa que la baquelita, por ello el recubrimiento con aceite de linaza no es necesario. En ese momento, esto era un punto importante, ya que no se conocía lo que podría pasar con el recubrimiento de linaza a largo plazo. Las RPCs con electrodos de vidrio son muy populares y hasta el día de hoy siguen siendo utilizadas en experimentos de física de altas energías.

2.4.2.3. Geometría del detector

Aunque en secciones anteriores las dos geometrías, cilíndrica y placas plano paralelas, se trataron al mismo nivel, desde el punto de vista histórico, los detectores con geometría plana fueron desarrollados relativamente tarde con respecto a los detectores con geometría cilíndrica. La necesidad de desarrollar detectores gaseosos con una resolución temporal mejor que la proporcionada, por ejemplo, por los detectores Geiger-Muller, o los derivados de este, fue determinante para impulsar el desarrollo de detectores con geometría plana.

Para entender el porqué los detectores de placas paralelas podrían, en principio, proporcionar una resolución temporal mucho mejor que los dispositivos cilíndricos, se tiene que considerar la principal diferencia entre un detector con geometría cilíndrica y un detector basado en geometría plana, esta diferencia radica en la forma en la que el campo eléctrico disminuye inversamente con la distancia al cable central, mientras que para el detector plano el campo eléctrico es uniforme. Como el proceso de avalancha de electrones necesita un campo eléctrico lo suficiente intenso, la consecuencia es que el fenómeno de multiplicación en un detector con geometría cilíndrica solo puede suceder a distancias muy pequeñas del cable central, donde el campo eléctrico tiene la intensidad adecuada. En los dispositivos de placas paralelas, en principio, todo el volumen activo del detector tiene la capacidad de producir multiplicación.

2.4.2.4. Modos de operación

2.4.2.4.1. Modo avalancha

Cuando un muon energético incide en un RPC ionizará las moléculas de la mezcla de gas produciendo iones y electrones en el proceso. Debido a la intensidad del campo eléctrico (del orden de 100 kV/cm) creado por el alto voltaje dentro de la cámara, los electrones serán acelerados hacia el ánodo y los iones al cátodo, los

iones con una aceleración menor debido a sus grandes masas. Mientras que, los electrones serán acelerados a velocidades tales que colisionarán con otras moléculas del gas, produciendo otra ionización. Este proceso se repite para los electrones secundarios, lo que provocará que eventualmente haya una avalancha de electrones en dirección al ánodo. Este proceso hace posible inducir una carga lo suficientemente grande en la electrónica de lectura para ser medida.

Este modo se caracteriza por inducir una carga pequeña que es el resultado de la baja capacidad de amplificación del gas. Esto hace que la señal obtenida tenga que ser amplificada para ser correctamente medida. De hecho, esto es un problema, no solo por la necesidad de un amplificador sino porque también este amplificador de tener una ganancia alta y debe ser lo suficientemente rápido para reproducir las señales en la escala de nanosegundos. Sin embargo, este modo es menos demandante para el RPC permitiendo una operación más estable.

2.4.2.4.2. Modo streamer

Una avalancha puede transformarse en un streamer cuando hay una alta capacidad de amplificación del gas, esto ocurre cuando los fotones empiezan a contribuir a su propagación. La velocidad de propagación de los streamers fue medida y resultó ser significativamente más alta que la velocidad de deriva de una avalancha normal. En una etapa posterior, el streamer puede evolucionar a una descarga luminiscente, una descarga eléctrica o una chispa. Sin embargo, esos estados requieren una corriente considerable para fluir por el gap, que se suprime por la alta resistividad de los electrodos del RPC.

En el modo streamer se busca que aparezcan pequeñas descargas en el gap del RPC, ya que producirán una señal con mayor amplitud, lo cual implica que no habrá necesidad de un amplificador y esto simplificará la electrónica de lectura. En el modo avalancha los streamers no son deseados ya que empeoran la capacidad de conteo del detector.

2.4.2.5. Mezcla de gases

La elección de la mezcla de gas para una RPC es, en general, una tarea difícil. Ya que el gas, en cierto sentido se considera como el “núcleo” de un detector gaseoso, como lo son las RPCs. En particular, para una eficiente operación las RPCs se requiere el uso de un gas con una demandante combinación de características:

- El gas debe permitir la creación de una alta densidad de pares ion-electrón, para asegurar una alta eficiencia de detección; esto depende de la energía depositada por la partícula, el número atómico promedio, la densidad, y el potencial de ionización específico de la mezcla del gas a utilizar.
- El gas se debe caracterizar por una baja emisión de fotones y/o transmisión de ellos, para reducir los fenómenos relacionados con los fotones.
- Ser un gas electronegativo.
- No debe ser dañino para el ser humano.

Además, características que también son deseables se mencionan a continuación:

- Los procesos químicos que tienen lugar durante la multiplicación de electrones deben tener límites razonables con los siguientes aspectos:
 - La cantidad de químicos agresivos como el ácido fluorhídrico, los cuales podrían atacar la cámara y los componentes del sistema de gas, reduciendo el tiempo de vida útil del detector.
 - Materiales que provoquen el proceso de polimerización, ya que esto provocaría una aglomeración de material extraño en las placas.
- La mezcla de gas debe de ser amigable con el medio ambiente.

Diferentes mezclas de gas se han puesto a prueba con la intención de cumplir con los requisitos anteriormente mencionados. Las primeras tres condiciones se

cumplen cuando se usa una mezcla de tetrafluoroetano ($C_2H_2F_4$), un gas que se utiliza en plantas de refrigeración, comercialmente conocido como R134a con una densidad de 4.25 kg/m^3 , en combinación hexafluoruro de azufre (SF_6), un gas con gran electronegatividad y en algunas ocasiones también se utiliza butano (C_4H_{10}). El componente principal de la mezcla siempre es tetrafluoroetano (más del 90%) con un porcentaje bajo de los demás componentes.

2.4.2.6. Nuevos desarrollos en los RPCs

2.4.2.6.1. Multi-gap RPCs

Las cámaras de placas resistivas de múltiples gaps (usualmente conocidas como MRPCs) fueron propuestas por primera vez en 1996. La idea esencial fue dividir el espacio donde se encuentra el gas (lugar donde la ionización primaria se lleva a cabo) en partes más pequeñas. En la práctica esto se logra haciendo una pila completa de electrodos resistivos, los cuales solo los dos más extremos están conectados al alto voltaje, mientras que los internos se encuentran flotando eléctricamente (ver figura 2.8).

Es importante notar que, aunque las placas internas están eléctricamente flotando, ellas obtienen cierto voltaje por sí mismas (como se muestra en la figura 3.8, cuando se aplica un voltaje de 10 kV), no es necesario agregar ninguna conexión dentro del marco para suministrar voltaje a esas placas resistivas interiores. En el caso estático, esto sucede por simple electrostática, ya que sobre estas placas actúa un campo eléctrico fuerte y también gracias a la simetría del sistema. En el caso dinámico, hay un mecanismo de retroalimentación que tiende a mantener las placas a cierto potencial y que permite que haya una corriente igual en todos los gaps. Básicamente, si, por alguna razón el voltaje en uno de los electrodos se desvía, esto causaría un incremento en el campo eléctrico de algún gap adyacente y una disminución en otro; en el gap con campo eléctrico mayor, se darían avalanchas más grandes, en comparación con el gap que tiene un campo

eléctrico menor. Tener avalanchas más grandes implican un flujo mayor de iones y electrones en un gap (es decir, un incremento de corriente en un gap), lo que genera más carga en uno de los electrodos del gap vecino. Esto cambiara el potencial de ambos electrodos, teniendo como efecto final la restauración del campo eléctrico correcto.

La mayoría de las MRPCs que se han producido usan electrodos hechos de vidrio, un vidrio no distinto al que se usa para ventanas, el cual tiene una resistividad de unas cuantas veces $10^{12} \Omega \text{ cm}$, significativamente mayor que la resistividad característica de las RPCs hechas con baquelita. La distancia de separación entre las placas de vidrio se asegura constante colocando entre ellas un material cilíndrico aislante de diámetro apropiado (comúnmente se utiliza hilo de pescar).

La principal motivación para utilizar RPCs con múltiples gaps es que se obtiene una mejor resolución temporal conforme el número de gaps aumenta y su tamaño disminuye (ver figura 2.9).

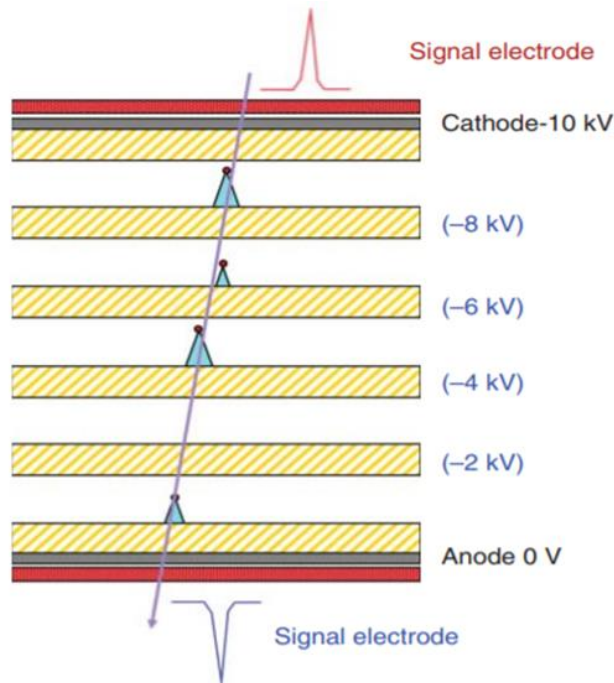


Figura 2.8: Diseño de una cámara de placas resistivas de múltiples gaps (MRPC).

El detector consiste en una pila de electrodos resistivos, cuando una partícula cargada atraviesa cualquiera de los gaps puede crear pares ion-electrón primarios.

Detectores de partículas 2.4. Detectores gaseosos

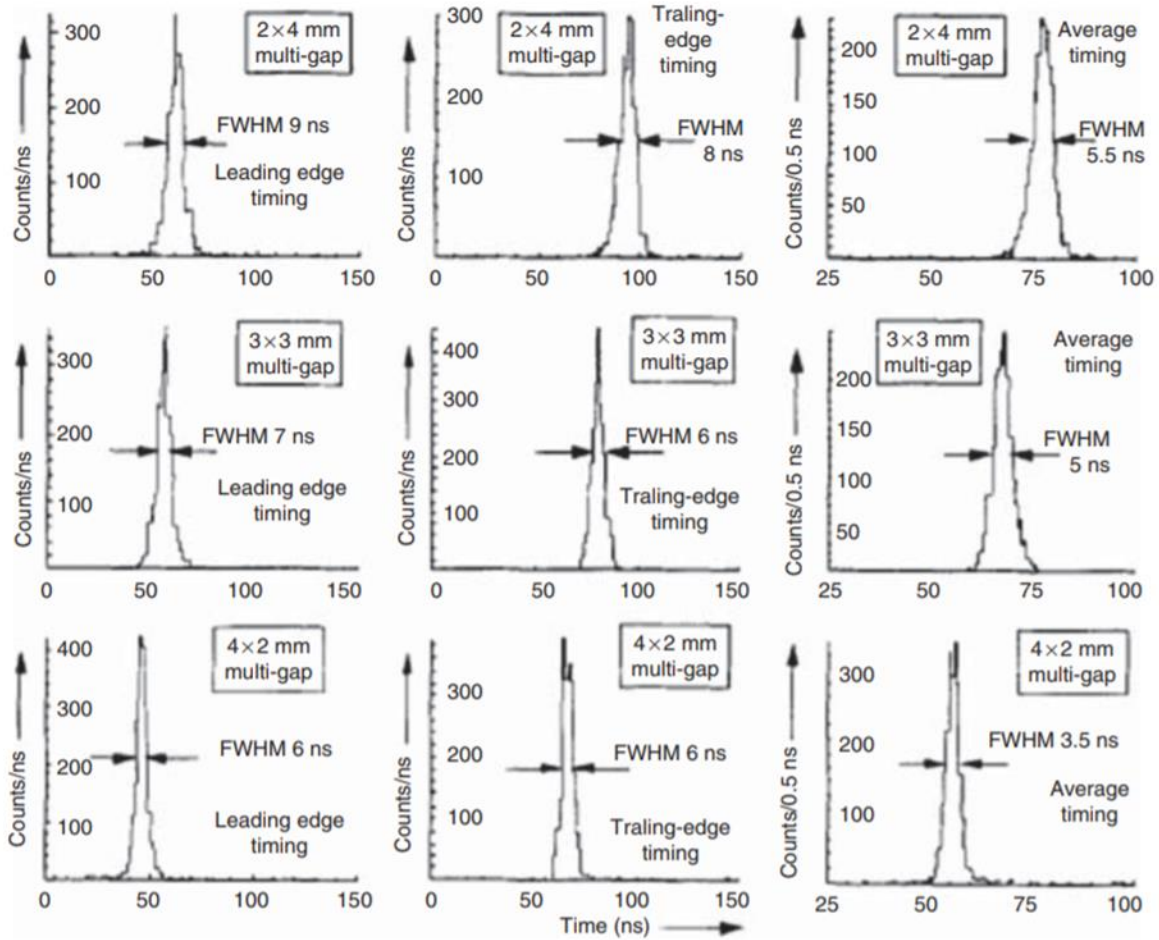


Figura 2.9: Distribuciones de tiempo para MRPCs de 2 gaps X 4 mm, 3 gaps X 3 mm y 4 gaps X 2 mm, estas RPCs estuvieron expuestas a un flujo de partículas de 100 Hz/cm^2 (Cerron Zeballos et al. 1997a).

2.4.2.6.2 Trigger RPCs

En el experimento Aparato Toroidal del LHC (ATLAS, por sus siglas en inglés), se utilizan cámaras de placas resistivas con gaps de 2 mm, operadas en el modo streamer para el sistema de muones. Las RPCs fueron instaladas en un área de 3650 m² y cuentan con 355 000 canales independientes de lectura para proporcionar información sobre la presencia y determinar el tiempo de llegada de los muones, es decir, para dar una señal de disparo cuando se detecten muones. La presencia simultánea de cuatro muones podría revelar el decaimiento de la partícula de Higgs, que se podría crear en las colisiones protón-protón en el LHC. Para ser capaz de determinar confiablemente el muon que se genera en cada colisión, los detectores de disparo (trigger) deben alcanzar una resolución temporal de alrededor de 1 ns, resoluciones que pueden ser alcanzadas fácilmente con las RPCs.

2.4.2.6.3. Timing RPCs

Las cámaras de placas resistivas con gaps de 0.2 mm a 0.3 mm son ampliamente utilizadas para fines de tiempo de vuelo (Time-Of-Flight, por sus siglas en inglés). El rendimiento de las MRPCs es comparable con la tecnología utilizada para el sistema de TOF (Time-Of-Flight) basada en detectores de centelleo, sin embargo, la principal ventaja de las MRPCs es que tienen un bajo costo por canal. A continuación, se discute la implementación de la tecnología de las RPCs en el sistema de TOF en un experimento de altas energías, utilizando el ejemplo del experimento ALICE en el LHC.

En el gran colisionador de hadrones se llevan a cabo colisiones centrales de iones pesados como lo son las colisiones plomo-plomo, en la cuales, hay una alta multiplicidad de partículas, en estos casos la identificación de partículas (PID, por sus siglas en inglés) es una característica importante para el experimento. La cámara de proyección de tiempo (TPC, por sus siglas en inglés) se usa como

sistema principal de “tracking” (es decir, identificación de la trayectoria de la partícula), pero también proporciona identificación de la partícula, al medir la densidad de ionización que está dada por la pérdida de energía debido a la ionización dE/dx .

Los detectores utilizados en el sistema TOF de ALICE deben alcanzar una resolución temporal mejor que 90 ps. Incluyendo otras fuentes de errores de tiempo, se espera una resolución general de 150 ps, con esta resolución se garantiza poder distinguir kaones y piones. La tecnología por utilizar en el sistema de TOF de ALICE son MRPCs echas con placas resistivas de vidrio con gaps de tamaño de 0.25 mm y operadas en el modo de avalancha.

Capítulo 3

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas

3.1. Diseño del detector

La cámara de placas resistivas que fue construida para este trabajo de tesis está compuesta por dos gaps, los cuales se generan al colocar las placas resistivas de forma paralela, las placas están hechas de vidrio cuyo espesor es de 2 mm, que como ya se dijo en el capítulo anterior, este vidrio es el mismo que se utiliza comúnmente para ventanas. La distancia de separación entre las placas se asegura constante colocando hilo de caña de pescar de 1 mm de diámetro entre las placas, es decir, se tienen dos gaps de 1 mm. Las placas que se encuentran más externas se pintaron por la cara exterior con una mezcla de pintura que contiene grafito y pintura acrílica. Este arreglo se colocó dentro de una caja hecha de acrílico para darle rigidez al detector. Las medidas finales del detector son de 25 cm X 25 cm X 1 cm. En la figura 3.1. se puede observar el diseño simplificado del detector.

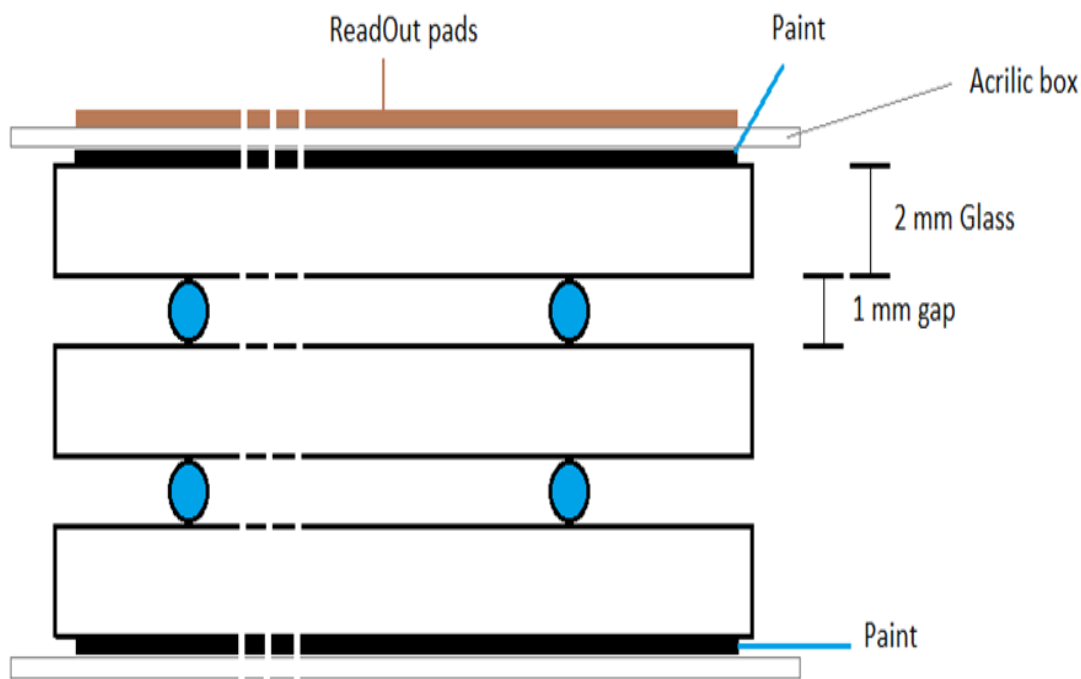


Figura 3.1: Diseño simplificado de la cámara de placas resistivas de doble gap.

3.2. Estructura del detector

Los electrodos del detector están hechos de vidrio Saint-Gobain de 2 mm de espesor, los cuales fueron adquiridos del tamaño apropiado en tiendas locales. Los vidrios se limpiaron exhaustivamente, primero con agua jabonosa y posteriormente con alcohol metílico. El siguiente paso fue preparar la mezcla de pintura, la cual está compuesta por grafito y pintura acrílica. Esta mezcla se aplicó sobre dos de las placas de vidrio en alguna de sus caras. Para aplicar la pintura se utilizó una compresora y una pistola rociadora. Una vez seca la pintura, se dibujó un marco con pintura de plata como se muestra en la figura 3.2, esto para que el alto voltaje se distribuya uniformemente sobre todo el electrodo. Una vez seca la pintura de plata se colocó una última capa de pintura de grafito. Esta mezcla de pintura se caracteriza por tener una alta resistividad superficial, la cual fue medida y fue de aproximadamente $5 \text{ M}\Omega/\square$.

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas
3.2. Estructura del detector

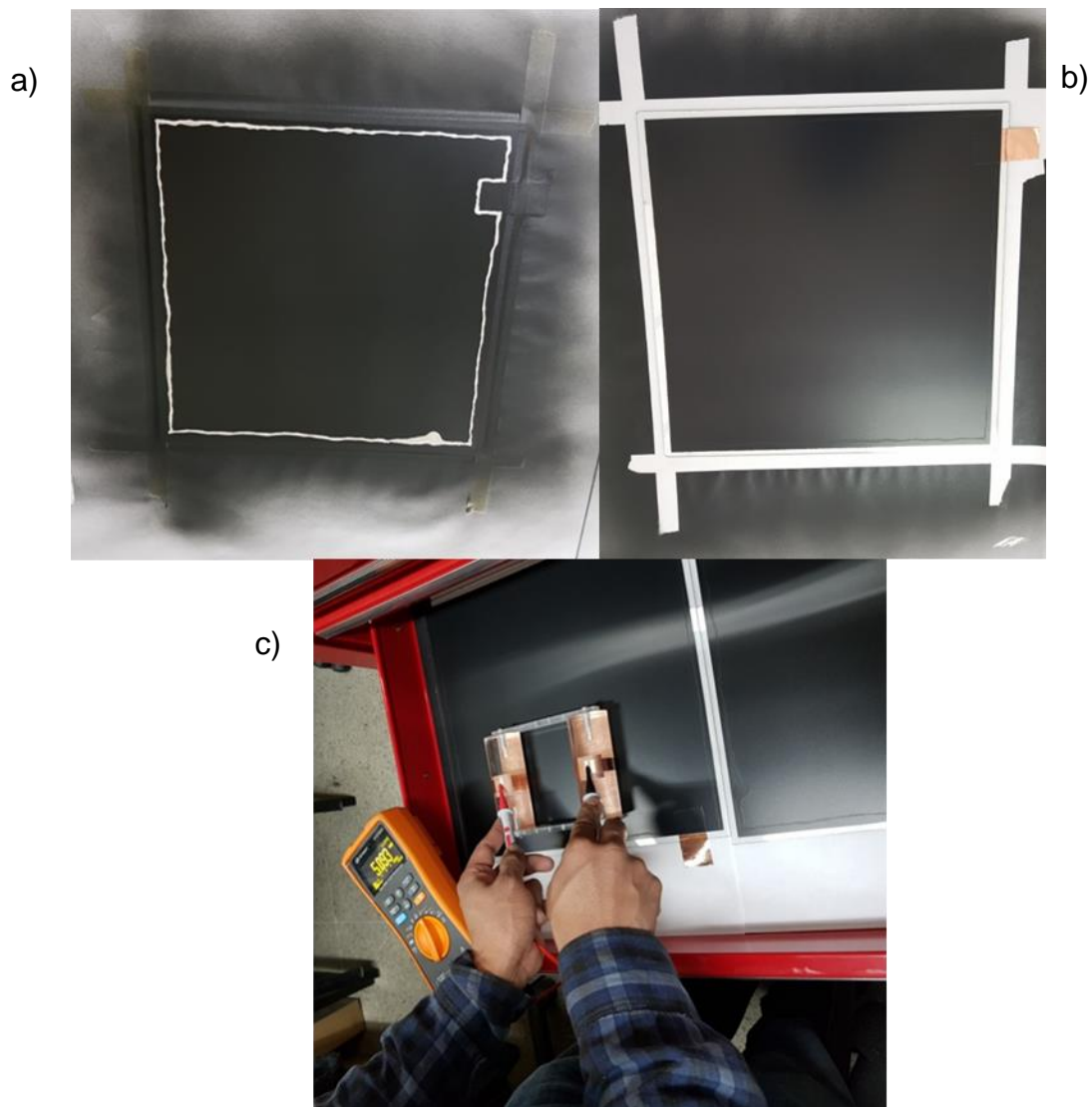


Figura 3.2 : (a) Marco de pintura de plata, el cual asegura una distribución uniforme del alto voltaje. (b) Estado final del proceso de pintado del electrodo. (c) Medición de la resistividad superficial de los electrodos.

Para construir lo que se conoce como la caja del RPC, es decir, la estructura que da rigidez al detector y a la vez contiene al arreglo de las placas resistivas, se utilizaron cuatro barras de acrílico de 25 cm X 2.5 cm X 1 cm. Con la ayuda de una maquina CNC se hizo un canal a cada una de las barras (ver figura 3.3 c), el canal tiene como propósito ayudar a sellar la caja del RPC. Posteriormente a dos de las barras de acrílico se les realizó una perforación para que sobre ellas se pudieran

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas
3.2. Estructura del detector

fijar los conectores de entrada y salida del flujo de gas. Para formar el marco de la caja del RPC se unieron con resina las cuatro barras de acrílico (figura 3.3 a). Por último, se cortaron dos láminas de acrílico de 20 cm X 20 cm X 1 cm que sirven como tapas para la caja. A continuación, se describe como se realizó el ensamble de la cámara de placas resistivas.

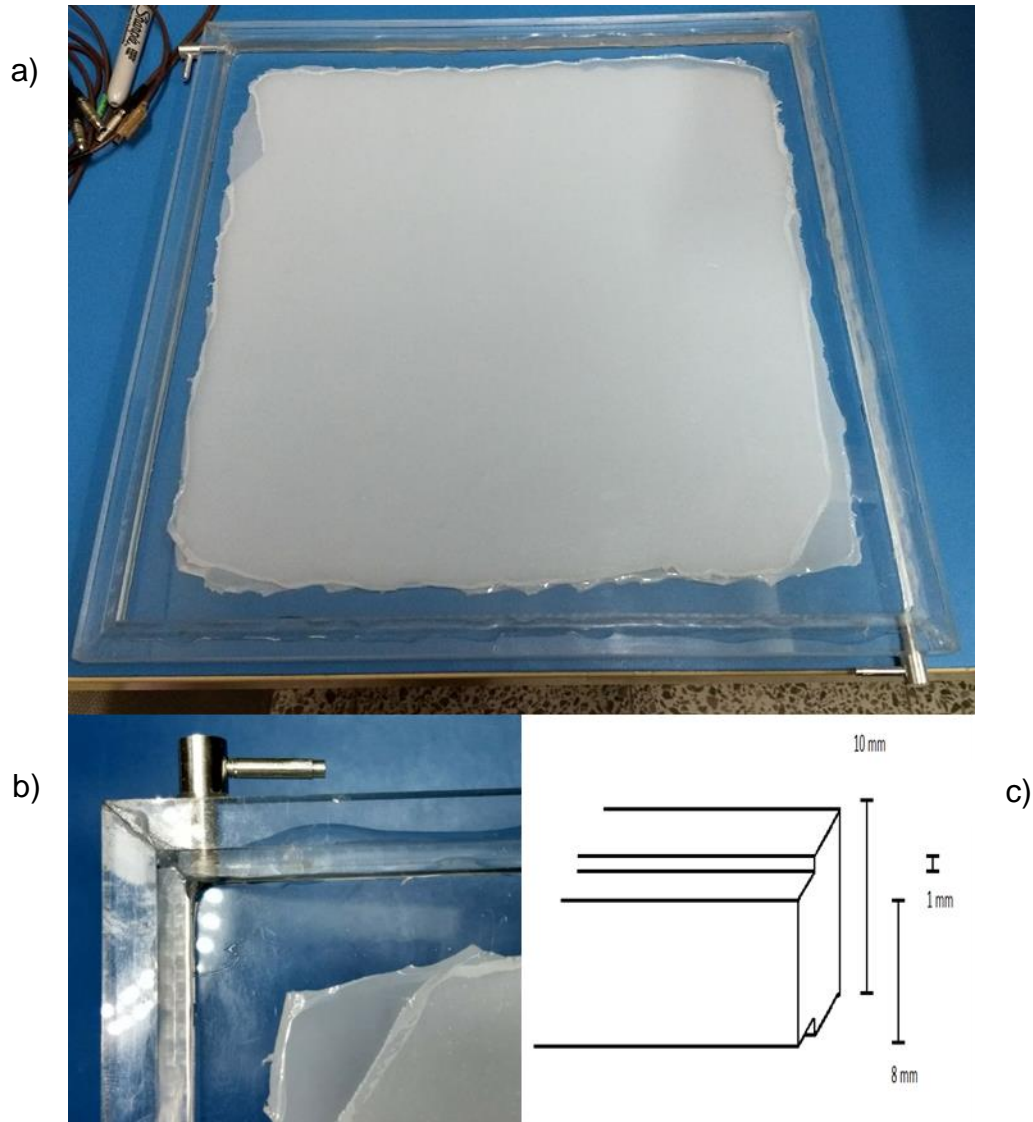


Figura 3.3: (a) Marco de la caja del RPC. (b) Unión de la barra de acrílico con el conector de gas. (c) Canal hecho a la barra con ayuda de la maquina CNC.

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas
3.2. Estructura del detector

El proceso de ensamblado del RPC comenzó pegando con resina una de las tapas de acrílico al marco de la caja, una vez seca la resina se hizo una limpieza exhaustiva de la estructura resultante. El siguiente paso fue colocar dentro de la caja del RPC uno de los electrodos con pintura de grafito, la cara que fue pintada quedó en contacto directo con la tapa de acrílico (ver figura 3.1). Como se mencionó al principio del capítulo, se utilizó hilo de caña de pescar para mantener fija la separación entre los electrodos (generar el primer gap de 1 mm). Se podría decir que después de la placa de vidrio pintada sigue “una capa” de hilo de caña de pescar. El hilo se mantiene fijo con respecto a la caja del RPC con la ayuda de pequeñas piezas de plástico, que se maquinaron con la maquina CNC (ver figura 3.4 a y 3.4 b). A continuación, se colocó un vidrio sin pintar seguido de una última capa de hilo para formar el segundo gap. Los pasos finales son colocar el último electrodo con pintura de grafito, de forma que la superficie sin pintura quede en contacto con el hilo y, por último, se fijó con resina la tapa restante de la caja del RPC.



Figura 3.4: (a) Piezas de plástico maquinadas para sujetar el hilo de caña de pescar. (b) Proceso de ensamblado del detector. (c) Estado final del detector de cámaras de placas resistivas.

3.3. Sistema de distribución de gases

Una vez terminado el proceso de ensamble del RPC lo que sigue es el acondicionamiento del detector, que consiste en mantener el detector en operación, durante el periodo de tiempo de una semana, el gas que se hizo circular por los gaps del detector para este proceso fue argón puro. Para saber cuál es el flujo de gas que hay en el detector se utiliza un contador de burbujas (ver figura 3.5), el cual fue construido con tubos de acrílico. Después de este proceso, el detector se encuentra listo para operar correctamente. El gas que finalmente se utilizó para poner a operar normalmente el detector fue tetrafluoroetano (freón).



Figura 3.5: (a) Tubos de acrílico utilizados para construir el sistema del contador de burbujas. (b) Cortes realizados al acrílico, los cuales fueron rectificadas con ayuda de un torno. (c) Estado final de la construcción del sistema contador de burbujas.

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas
3.3. Sistema de distribución de gases



Figura 3.6: Sistema contador de burbujas en operación.

3.4. Diseño experimental

Para la caracterización del detector de cámaras de placas resistivas se utilizó una placa de cobre con dimensiones 25 cm X 25 cm que sirvió para recolectar la señal de salida del detector, para esta placa se utilizó el arreglo de un pad el cual tiene el tamaño de 19.5 cm X 19.5 cm, que cubre exactamente el área efectiva de detección del RPC construido. Para generar el trigger se utilizó la tecnología del plástico centellador, los cuales se colocaron a una distancia fija de 10 cm por arriba y por debajo del detector (ver figura 3.8). Para suministrar el alto voltaje a los electrodos del detector se utilizó una fuente CAEN DT1471ET la cual permite llegar a un voltaje máximo de 11 kV. En la figura 4.8 se puede observar una vista general del diseño experimental.



Figura 3.7: Se construyó una caja con barras y placas de aluminio, para tener precaución con las conexiones de alto voltaje, gas y la señal de salida del detector, así también para proteger al detector y darle una estructura más rígida.



Figura 3.8: Arreglo experimental utilizado para la caracterización de una cámara de placas resistivas de doble gap.

La primera medición realizada al detector fue la resistividad, este proceso comenzó aplicando una diferencia de potencial de 5500 V entre los electrodos del detector, a continuación, se midió la corriente. Esta medición se realizó con ayuda de la fuente de alto voltaje, la cual muestra en todo momento la corriente que utiliza el detector. Este proceso se realizó varias veces, aumentando la diferencia de potencial 200 V cada vez por medición, hasta llegar al límite de la fuente.

Para determinar la eficiencia del detector, se ajustó el voltaje de operación de los tubos fotomultiplicadores (PMTs, por sus siglas en inglés), en el cual ambos plásticos registraran cuentas similares. El voltaje aplicado a los electrodos del RPC fue variando desde 7800 V a 11000 V, aumentando 200 V entre cada medición. Los datos se tomaron con ayuda de un contador de pulsos (ver figura 3.9), el cual fue diseñado y construido por el Dr. Guillermo Tejeda. Esta electrónica se encarga de registrar las coincidencias entre cada plástico centellador y registra por separado las cuentas de las señales del RPC, al final la electrónica muestra los valores obtenidos y las coincidencias entre los tres detectores.



Figura 3.9: Contadora de pulsos, utilizada para obtener los voltajes de operación de los PMTs y para determinar la eficiencia del detector de cámaras de placas resistivas.

Para obtener la distribución de carga y resolución temporal del RPC se utilizaron cuatro tarjetas electrónicas, las cuales se encargan de discriminar, manipular y entregar los tiempos de subida y de bajada de las señales del RPC. Además, una de las tarjetas se encarga únicamente de generar el trigger que cumple con las características que requiere la demás electrónica. Los dispositivos electrónicos utilizados se muestran en la figura 3.11, estos fueron alimentados con fuente de voltaje comerciales. El arreglo experimental es muy parecido al que se utilizó para determinar la eficiencia del RPC, se utilizaron dos plásticos centelladores como trigger, las señales salientes de los PMTs se enviaron a la electrónica encargada de generar el trigger, también una de las señales de un PMT se integró para poder obtener información acerca del tiempo de este dispositivo.

El arreglo de que se utilizó para los electrodos donde la señal del RPC es inducida fue el de un pad rectangular de 19.5 cm X 19.5 cm. La señal saliente del RPC se envió a un amplificador el cual aumenta en diez veces la señal, esta amplificación hace que la señal se sature cuando esta pasa por la motherboard. Por este motivo la señal después de ser amplificada se manda a un divisor de voltaje el cual disminuye la amplitud de la señal a la mitad, después de esto la señal ingresa a un Fan in-Fan out, el cual convierte las señales negativas de los detectores a

señales positivas (ya que es un requisito de la Daughterboard), y también nos permite obtener tres señales idénticas, esto se hace con la intención de mandar la misma señal a tres canales distintos de la electrónica encargada de integrar el pulso, ya que es la primera vez que se trabajó con esta electrónica y se quería conocer el comportamiento de la misma. Una vista general de las etapas por la cual pasa cada señal se muestra en la figura 3.10.

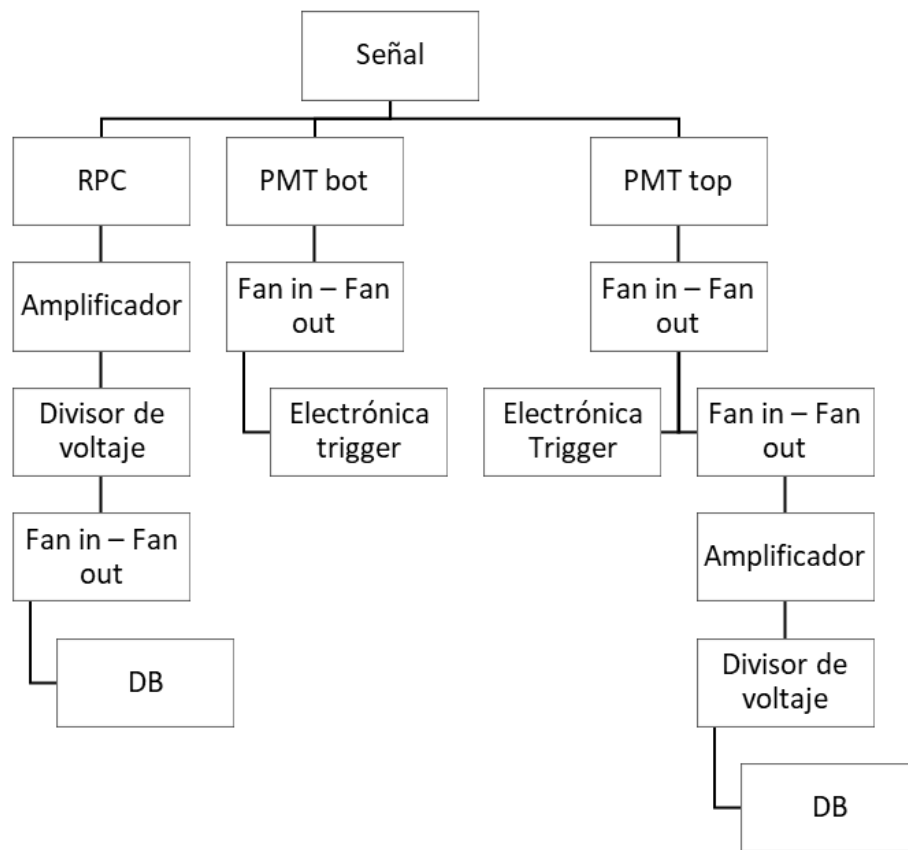


Figura 3.10: Etapas por las cuales pasa cada una de las señales de los detectores.



Figura 3.11: Electrónica encargada de la integración de las señales de los detectores, así como la generación del trigger.

3.4.1. Electrónica para adquisición de datos

La electrónica utilizada para la manipulación de las señales de los detectores consiste en dos tarjetas. La tarjeta DBO (DaughterBoard) y la tarjeta MBO (MotherBoard), también conocido como Front-End Electronics (FEE). El sistema de adquisición de datos (DAQ) junto con las tarjetas DBO y MBO se basan en la TRBV2 (TDC Readout Board). Los detalles se muestran en la figura 3.12, el cual muestra in diagrama del sistema FEE y DAQ, incluyendo las conexiones entre ambos dispositivos. En las siguientes secciones se muestra a detalle el funcionamiento del sistema FEE y DAQ.

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas
 3.4. Diseño experimental



Figura 3.13: Versión utilizada de la DBO con cuatro canales por tarjeta.

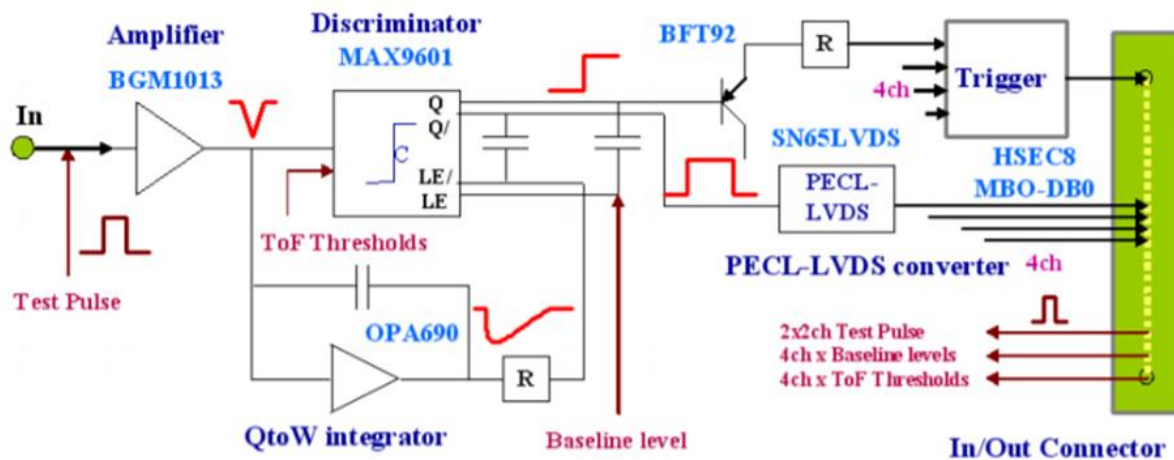


Figura 3.14: Diagrama de la lógica de un canal de la DBO, se muestran todos los pasos más importantes: amplificación, integración y discriminación.

3.4.1.2. Motherboard

La motherboard es la tarjeta que proporciona el sistema de comunicación entre las DBOs y el sistema de adquisición de datos. La tarjeta se divide en 8 bloques separados, uno por cada DBO. Estos bloques contienen inversores para proporcionar los umbrales que time-of-flight (tiempo de vuelo) y time-over-threshold necesitan. Las dimensiones de la MBO son de 40 cm X 6 cm = 240 cm², una imagen de la tarjeta se muestra en la figura 3.15, mostrando los bloques para cada DBO. Otras partes de esta tarjeta es la salida de la señal de disparo de bajo nivel para el sistema de adquisición, la cual se obtiene de las señales que salen de cada DBO, y la conversión LVDS para enviar las señales de control y prueba a la TRB.

La MBO da soporte a 32 canales, es decir, se pueden conectar hasta 8 MBOs, o hasta 12 canales (3 DBOs) para MBOs de menor tamaño. Aunque el canal 32 se utiliza obtener la referencia del tiempo.

La MBO utilizada proporciona a la DBO:

- Una fuente de alimentación estable y de ondulación baja.
- Voltajes de discriminación programables.
- Señales de prueba y caminos para todas las señales del detector/trigger.



Figura 3.15: Vista desde arriba de la MBO de 32 canales.

3.4.1.4 Generación de Trigger

Cuando se empezó a trabajar con los sistemas de FEE y DAQ no se entendía del todo bien los datos obtenidos, esto se ocurría debido a que la señal de trigger no cumplía con una característica muy importante, la señal de trigger tenía que estar retrasada $1.1 \mu\text{s}$ con respecto a la señal del RPC a analizar. En la figura 3.17 se muestran las gráficas obtenidas al tomar datos con la señal de trigger retrasada distintos valores y en ellas se puede observar como a la derecha de la distribución de carga se forma un pico que va desapareciendo conforme el tiempo que se retrasa el trigger se acerca al valor de $1.1 \mu\text{s}$.

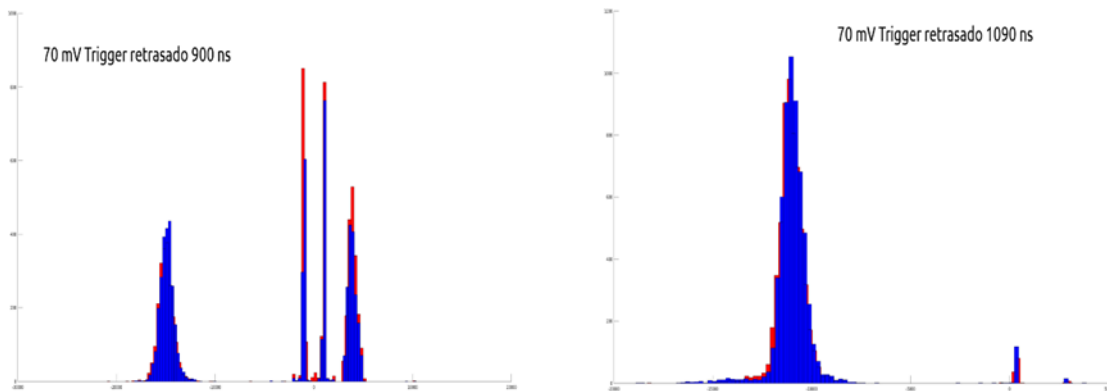


Figura 4.17: Gráficas cuentas ADC Vs Cuentas. (a) Se utilizó un voltaje de discriminación de 70 mV para generar la señal de trigger y la señal se retrasó 900 ns. (b) Se utilizó un voltaje de discriminación de 70 mV para generar la señal de trigger y la señal se retrasó 1090 ns, se puede observar como claramente el pico a la derecha de la distribución de carga desaparece a valores cercanos de $1.1 \mu\text{s}$.

Así que, para generar una señal de trigger adecuada, se diseñó la siguiente electrónica (Ver figura 3.17), la cual produce una señal de salida TTL y la retrasa $1.1 \mu\text{s}$ cuando recibe dos señales simultaneas de ambos PMTs, si es que las señales de los PMTs supera el voltaje de discriminación ajustado en la electrónica.

Diseño y construcción de un detector de cámaras de placas resistivas
3.4. Diseño experimental

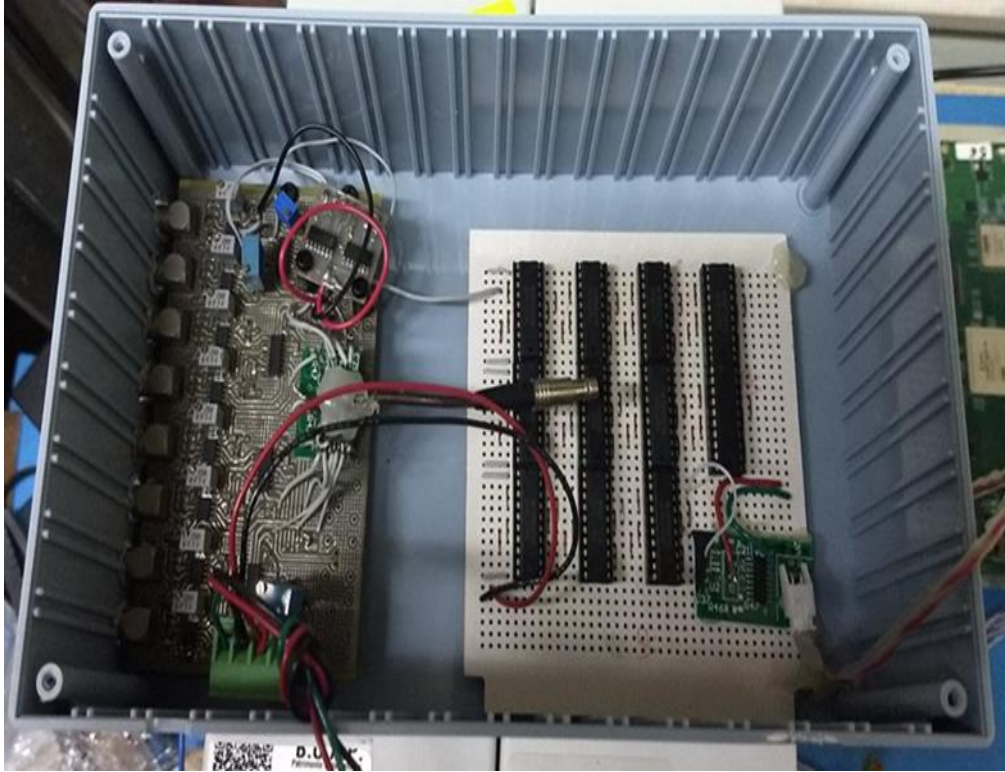


Figura 3.17: Electrónica diseñada para generar la señal de trigger.

3.5. Adquisición de datos

Para el proceso de adquisición de datos se utilizó un router el cual se conectó al puerto ethernet de la TRB, mediante un cable de red se hizo la conexión entre el router y una Raspberry PI, en la Raspberry se encuentran los programas para iniciar la comunicación y la toma de datos con la tarjeta TRB. Después, mediante una computadora con sistema operativo Linux se accedió a la Raspberry conectando entre el router y la computadora otro cable de red. Para iniciar la comunicación entre la raspberry y la computadora se abrió una ventana de Terminal y se escribió el comando para iniciar la comunicación entre ellos vía SSH, una vez dentro de la raspberry se ejecutó el comando para iniciar la toma de datos. Una vez finalizada la toma de datos se crea un archivo con extensión .hld, este archivo debe de reconstruirse ejecutando un programa con el software Octave. Una vez reconstruidos los datos se generará un archivo con los siguientes datos: TRBids, dataLeadings, dataTrailings, eventDate, extendedData y numberEvents. Los datos que fueron de interés para el análisis de datos fueron los tiempos de subida de la señal de los detectores (dataLeadings) y los tiempos de bajada (dataTrailings).

Capítulo 4

Resultados experimentales

En este capítulo se muestra el análisis de los datos obtenidos para poder obtener la resistividad, eficiencia, distribución de carga y resolución temporal del detector de cámaras de placas resistivas construido. El detector se puso a prueba en todos los casos con cósmicos.

4.1. Resistividad

A continuación se muestra en la figura 4.1 la gráfica corriente vs voltaje aplicado al detector RPC, se puede observar en la gráfica que a bajos voltajes (5.5 kV-9.4kV) el detector se comporta como un no conductor, pero en el rango de 9.6 kV-11 kV se comporta como un conductor, es en este rango de valores del voltaje aplicado se aplicó la ley de Ohm, es decir, en este rango se hizo un ajuste a una línea recta donde la pendiente de la recta nos indica el valor de la resistencia del detector. A continuación, la resistencia obtenida se multiplicó por un coeficiente que está relacionado con la geometría de las placas resistivas y con el material del que están

hechas. La resistividad obtenida para el detector de cámaras de placas resistivas es de $5.6 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

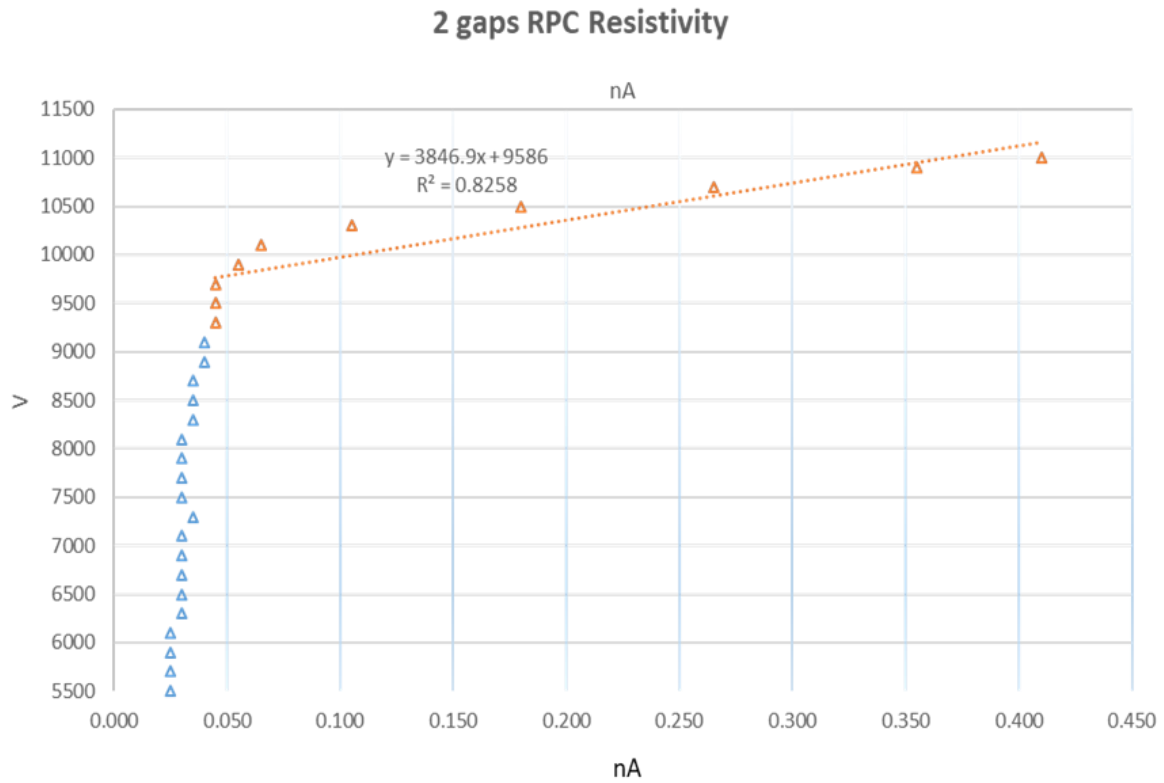


Figura 4.1: Gráfica corriente vs voltaje aplicado.

4.2. Eficiencia

En la figura 4.2 se muestra la eficiencia obtenida para el detector de cámaras de placas resistivas de doble gap que se construyó para este trabajo de tesis, el gas utilizado para obtener estos resultados fue freón, y se utilizaron dos plásticos centelladores que funcionaron como trigger. En la gráfica se observa que en el rango de 10.6 kV-11kV se alcanza la región de saturación (plateau). Esto también nos dice que la eficiencia que logra el detector construido es comparable con la eficiencia del plástico centellador. Con esta información se decidió que el valor de los voltajes a los cuales se operaría el detector para obtener la distribución de carga y resolución temporal serían los que se encuentran entre estos valores.

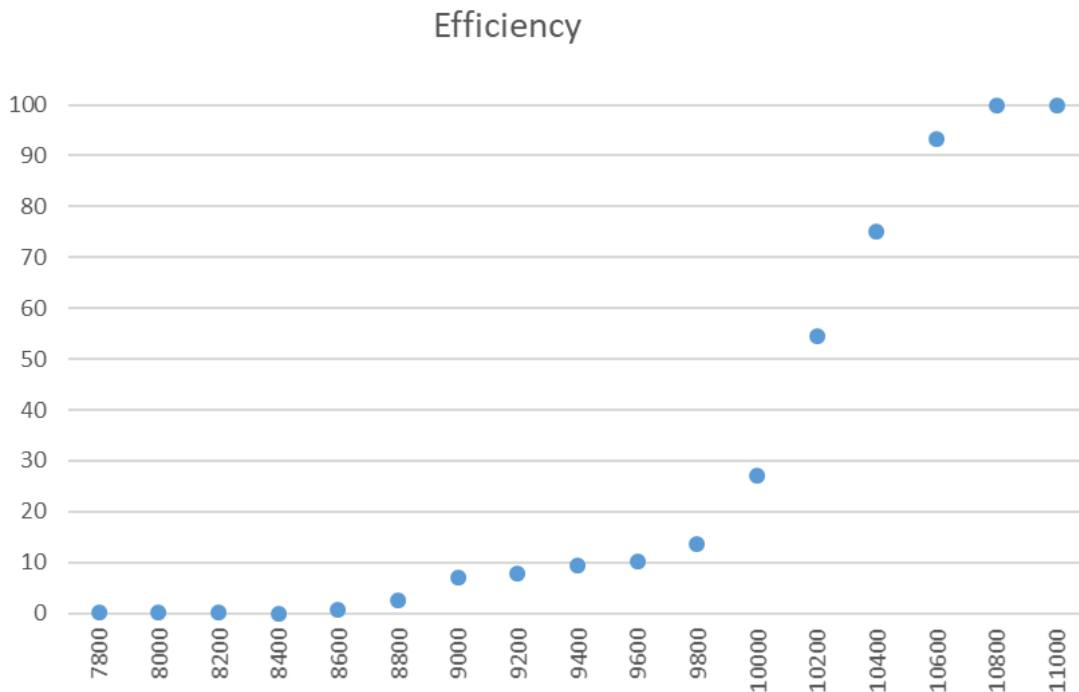


Figura 5.2: Gráfica eficiencia del RPC de doble gap.

4.3. Distribución de carga

Para construir la gráfica de distribución de carga (figura 4.3 - figura 4.8), se utilizaron los datos que se obtuvieron con el sistema de adquisición de datos, que son los tiempos de subida y de bajada de las señales que entregan el RPC y uno de los plásticos centelladores que se utilizaron como trigger. Para analizar los datos se utilizó el software ROOT, el cual es un proyecto de código abierto coordinado por el CERN. ROOT proporciona una interfaz de programación para usar en aplicaciones propias y también una interfaz de usuario gráfica para el análisis de datos. Para hacer el análisis de datos con ROOT se desarrollaron códigos de programación para seleccionar los `dataLeadings` y `dataTrailings` de cada evento y hacer la diferencia entre estos tiempos, ya que esto nos da la carga y a continuación realizar la correspondiente gráfica para cada toma de datos. Como se puede apreciar en cada una de las distribuciones se tiene la gráfica esperada.

En cada una de las siguientes figuras se muestran cuatro distribuciones de carga, las primeras tres corresponden a las señales entregadas por el mismo pad del RPC, y el cuarto canal corresponde a la señal del plástico centellador que se colocó por encima del RPC. En cada una de las gráficas el eje X son el número de cuentas ADC y en el eje Y es el número de cuentas.

Resultados experimentales
4.3. Distribución de carga

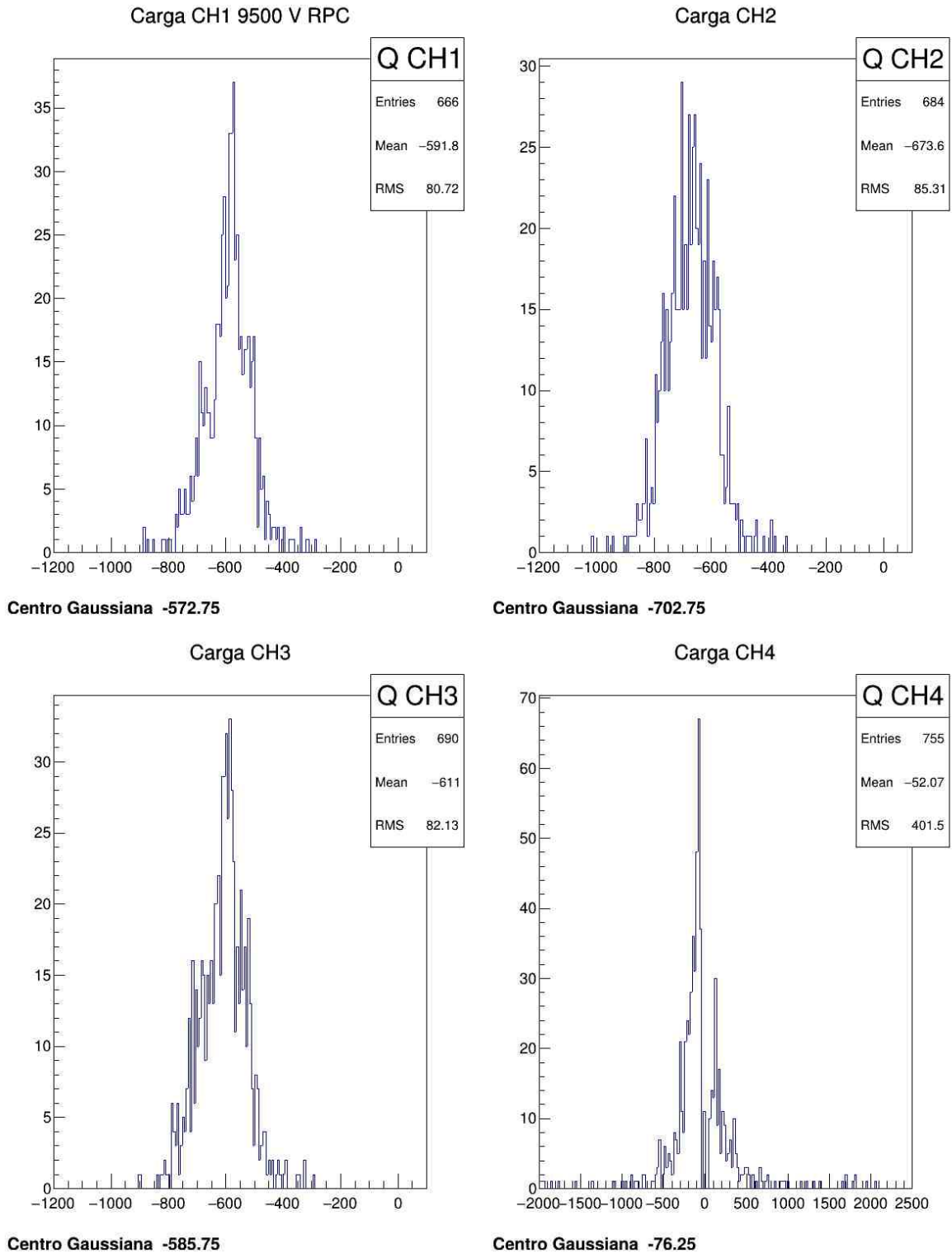


Figura 4.3: Distribución de carga obtenida para el RPC operando a 9.5 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

Resultados experimentales
4.3. Distribución de carga

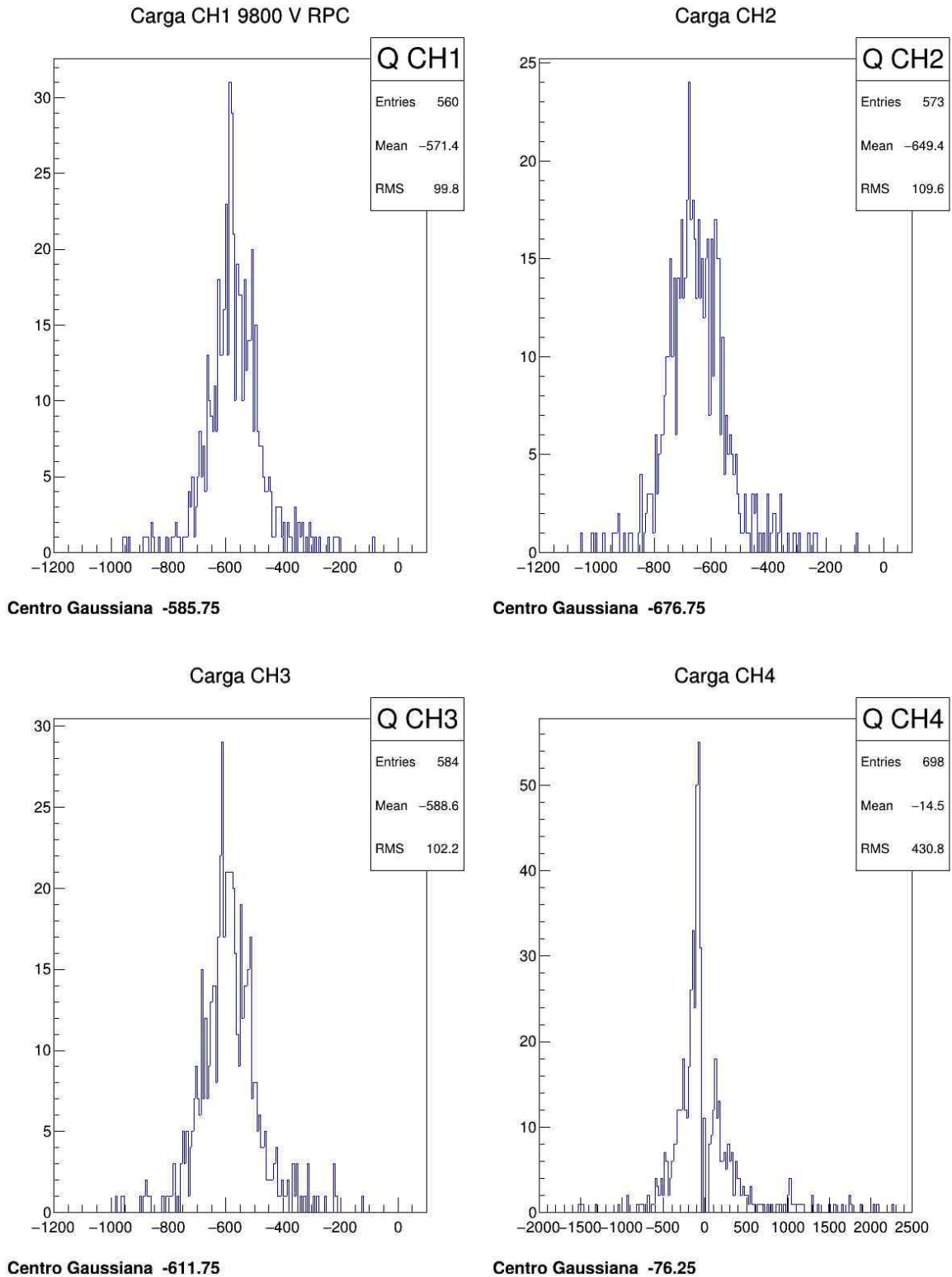


Figura 4.4: Distribución de carga obtenida para el RPC operando a 9.8 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

Resultados experimentales
4.3. Distribución de carga

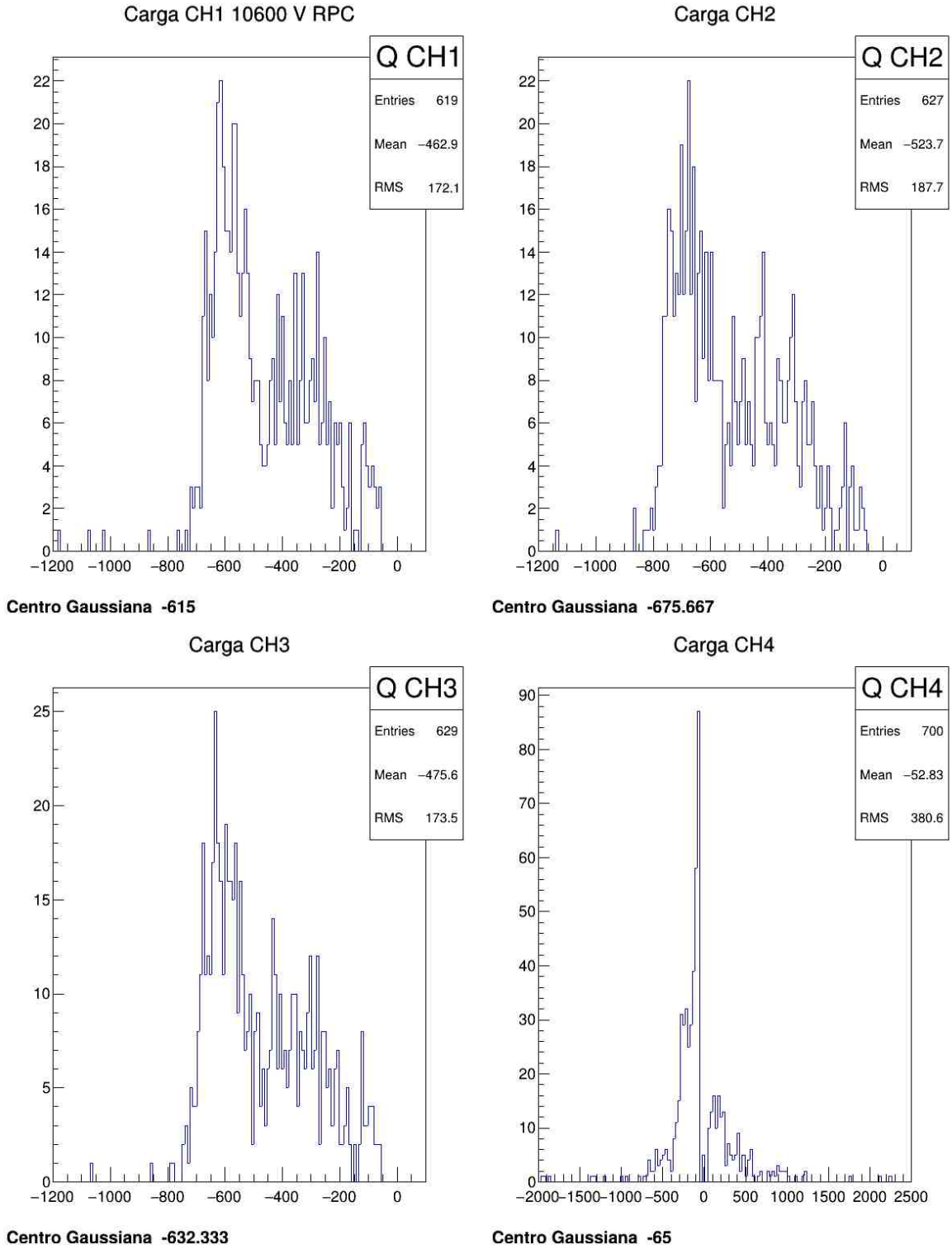


Figura 4.5: Distribución de carga obtenida para el RPC operando a 10.6 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

Resultados experimentales
4.3. Distribución de carga

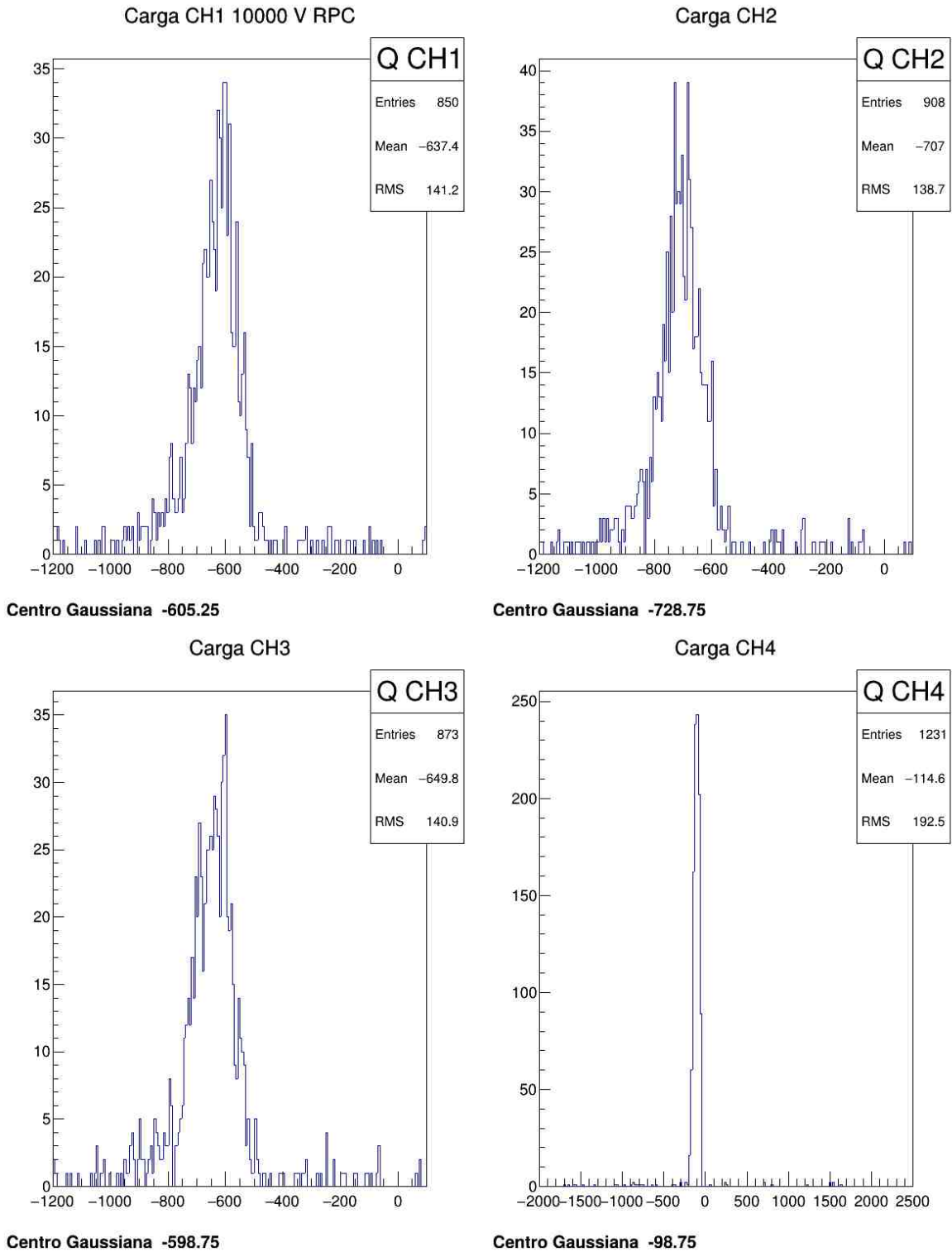


Figura 4.6: Distribución de carga obtenida para el RPC operando a 10 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

Resultados experimentales
4.3. Distribución de carga

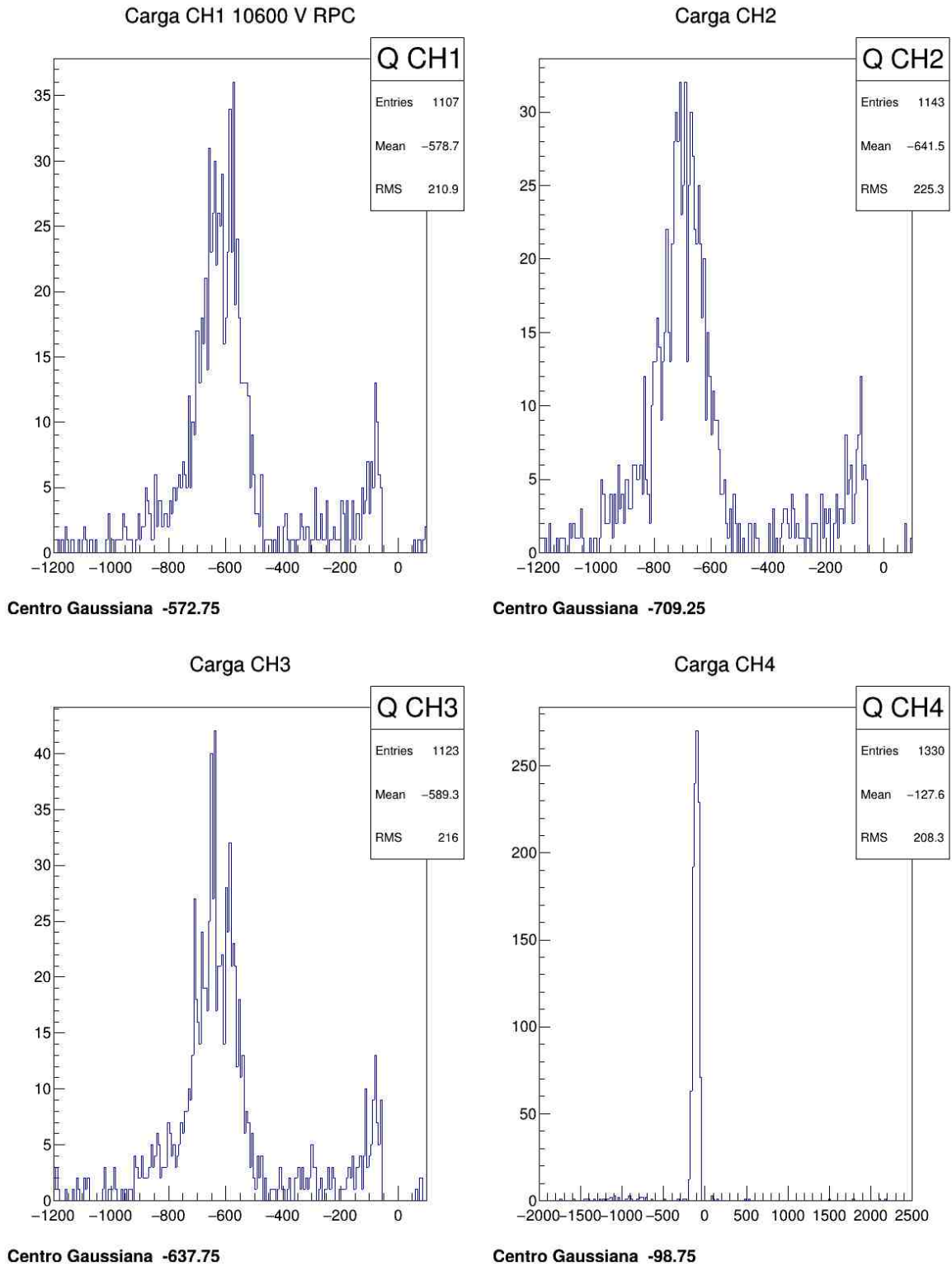


Figura 4.7: Distribución de carga obtenida para el RPC operando a 10.6 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

Resultados experimentales
4.3. Distribución de carga

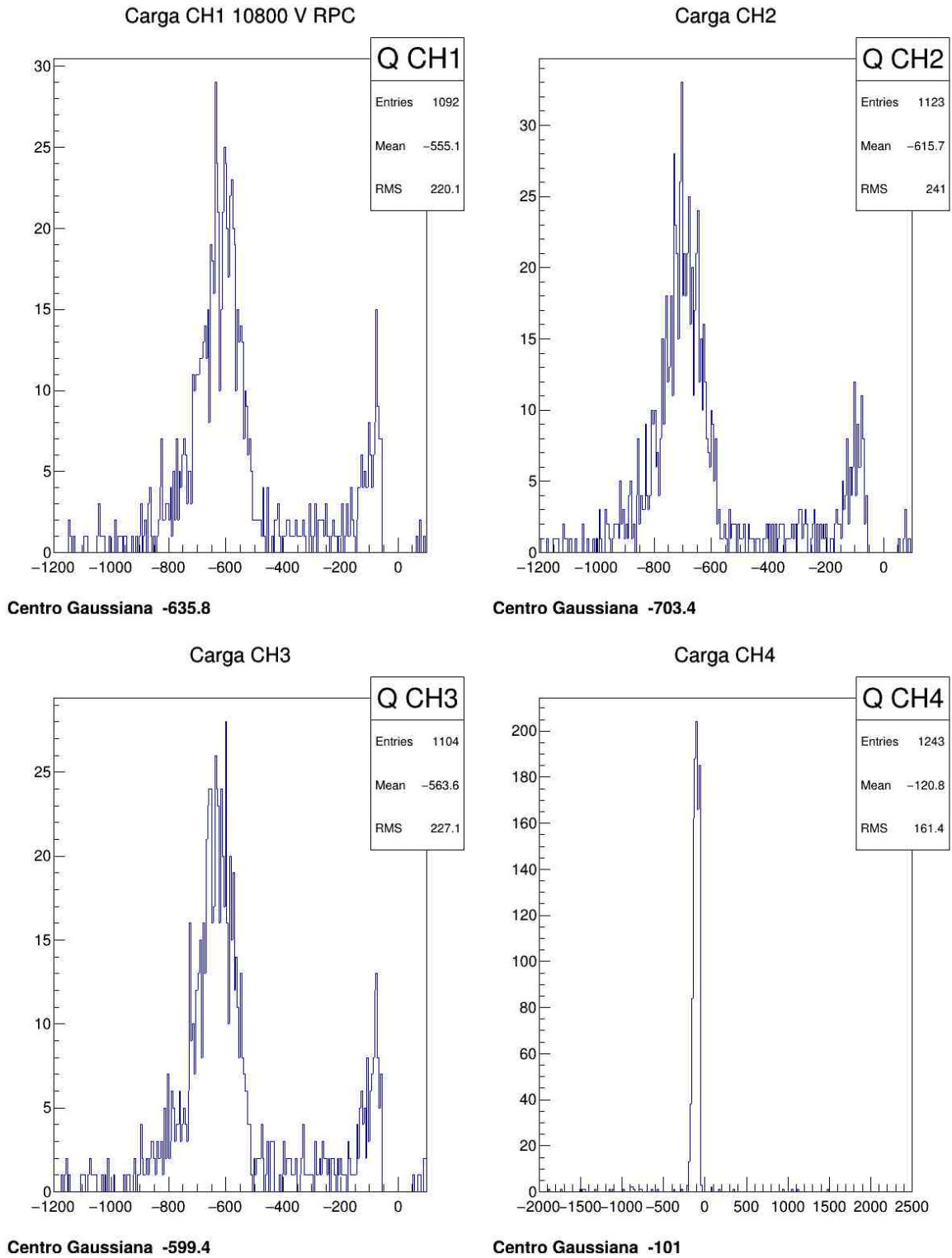


Figura 4.8: Distribución de carga obtenida para el RPC operando a 10.8 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

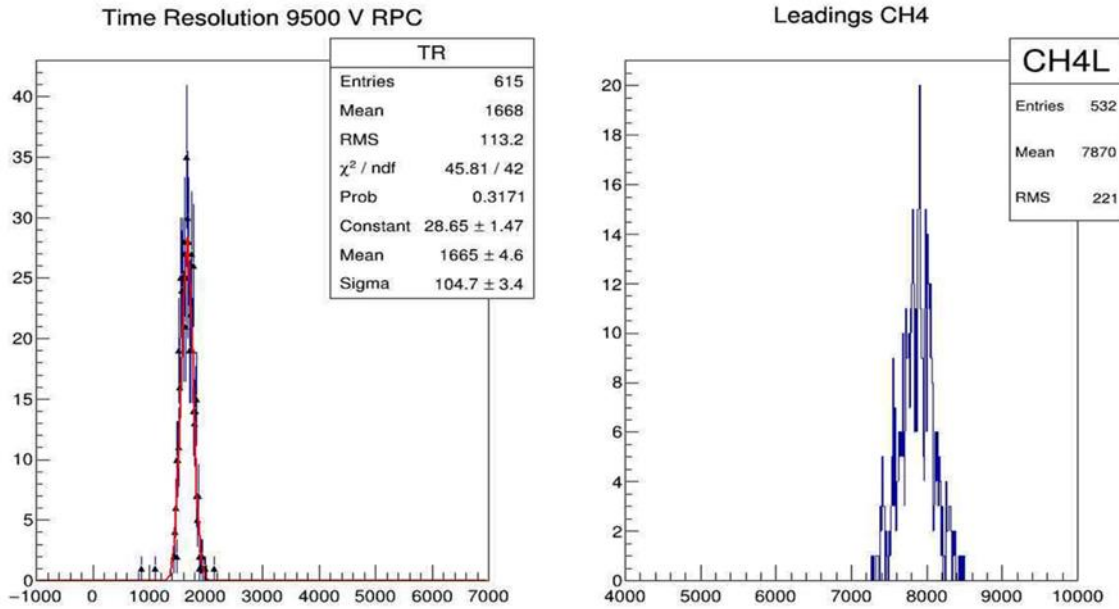
4.4. Resolución temporal

Para obtener el valor de la resolución temporal del detector se hizo la siguiente operación: a los datos obtenidos del tiempo de subida de la señal del plástico centellador colocado por arriba del RPC se le restó en tiempo de subida de la señal del RPC, esto para cada evento obtenido por el sistema de adquisición de datos. Posteriormente se construyó la gráfica de la distribución obtenida y se hizo el ajuste de la distribución a una distribución Gaussiana. Finalmente se obtuvo el FWHM (anchura a media altura), este valor nos da la resolución temporal del detector cabe mencionar que este valor está dado en unidades de tiempo de la electrónica que equivalen a 25 ps.

En las siguientes figuras se muestra las distribuciones obtenidas, con su respectivo ajuste y cálculo de FWHM, en cada gráfica el eje X representa el tiempo en unidades de la electrónica, el eje Y representa el número de cuentas. En el lado derecho de cada distribución también se muestra una gráfica que se obtiene cuando se considera solo los tiempos de subida del plástico centellador que se usó como trigger.

Y por último se muestra la gráfica carga vs tiempo, la cual también nos ayuda a calcular la resolución temporal de detector.

Resultados experimentales
4.4. Resolución temporal



FWHM 246.451

Figura 4.9: Resolución temporal obtenida de 6.16 ns para el RPC operando a 9.5 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

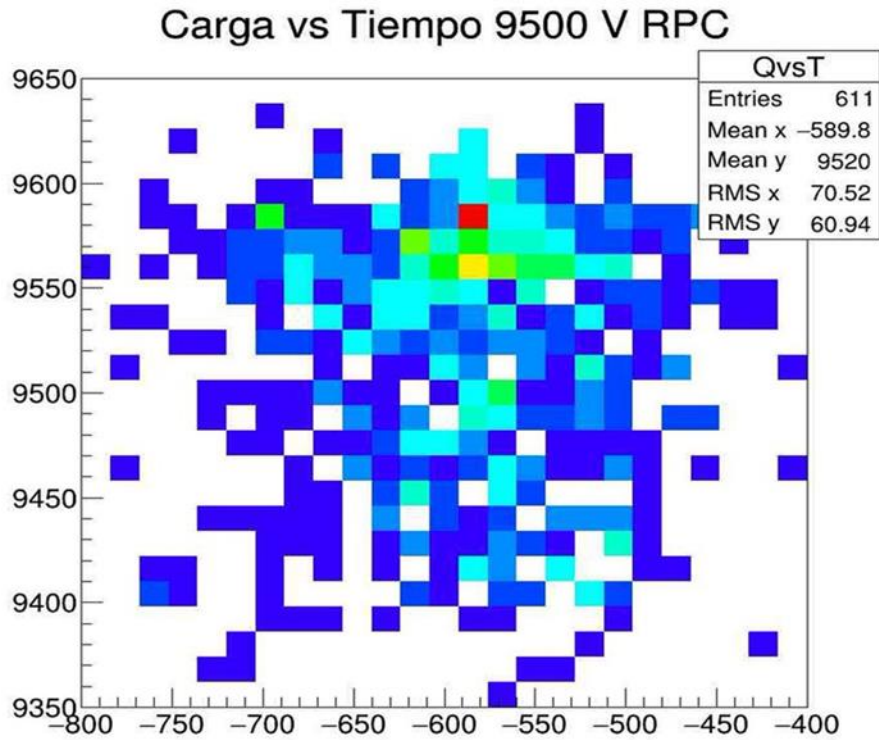
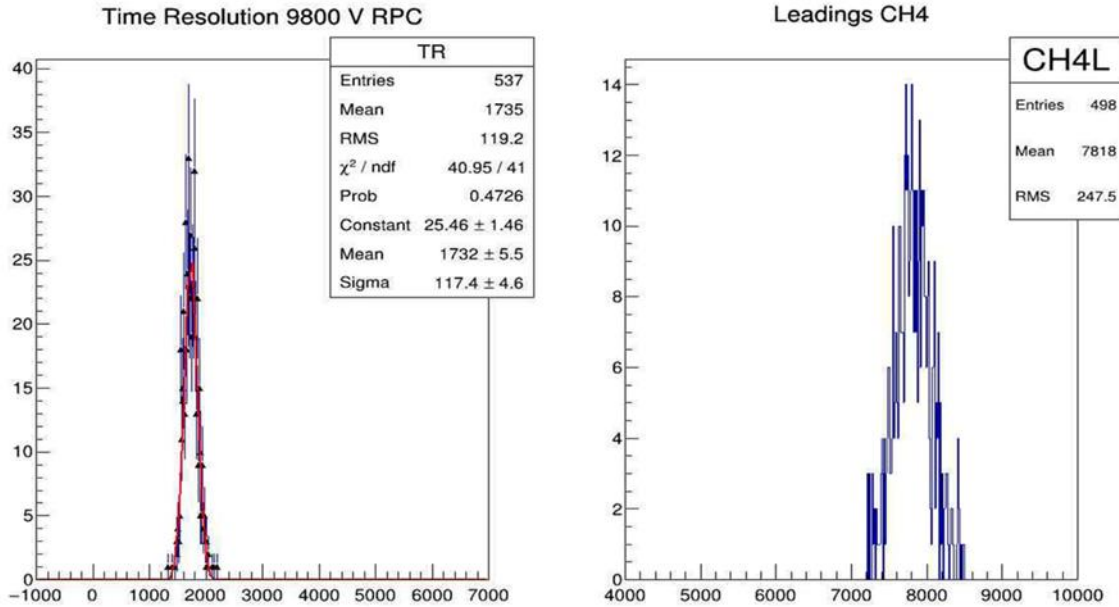


Figura 4.10: Gráfica Carga vs Tiempo obtenida para el RPC operando a 9.5 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.



FWHM 276.556

Figura 4.11: Resolución temporal obtenida de 6.91 ns para el RPC operando a 9.8 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

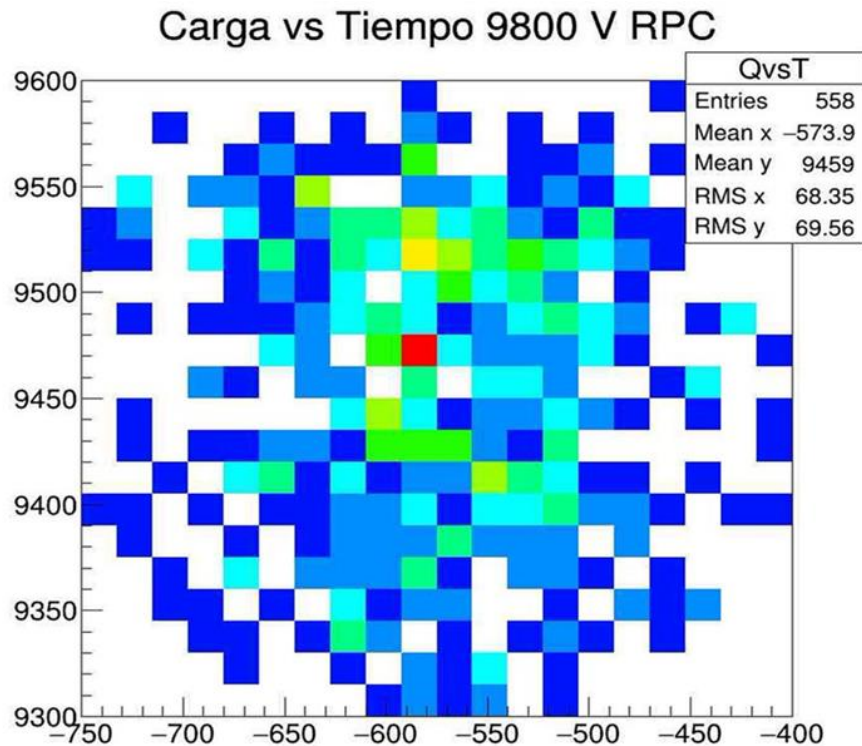


Figura 4.12: Gráfica Carga vs Tiempo obtenida para el RPC operando a 9.8 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

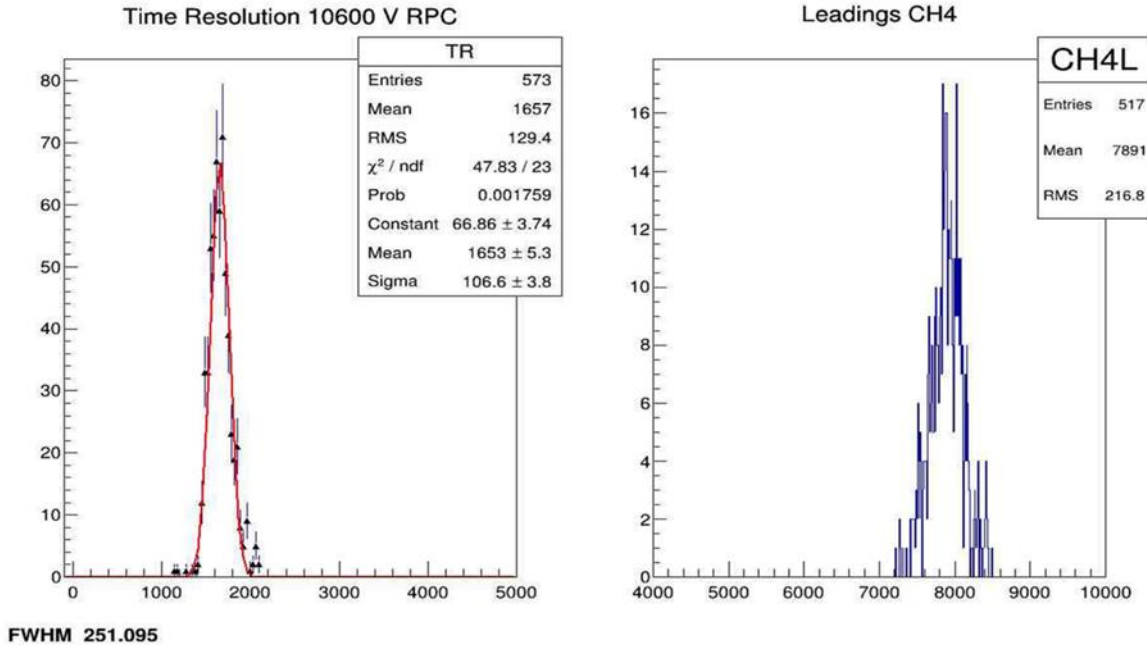


Figura 4.13: Resolución temporal obtenida de 6.27 ns para el RPC operando a 10.6 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

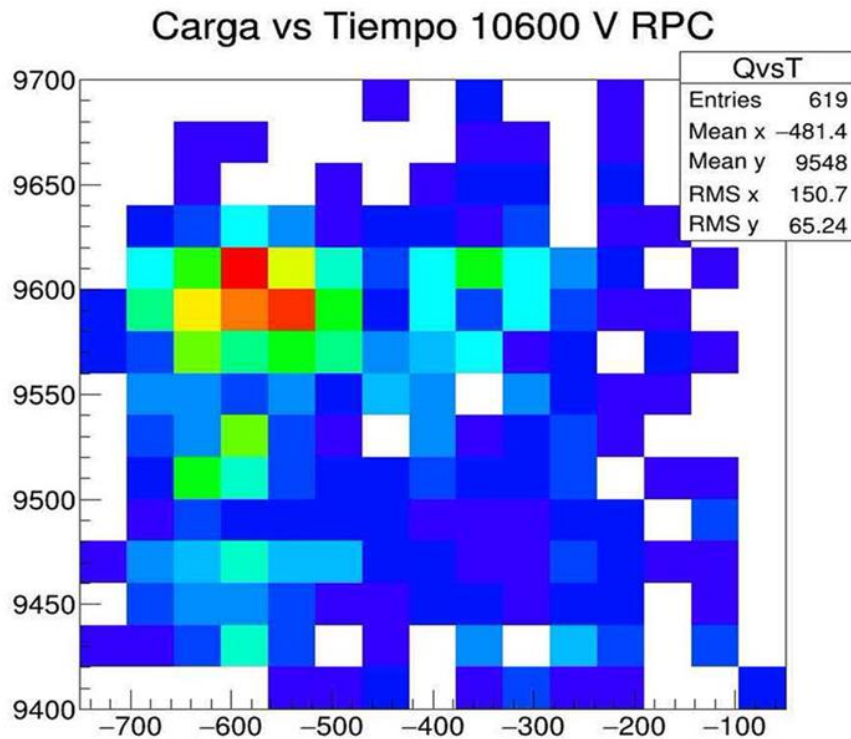
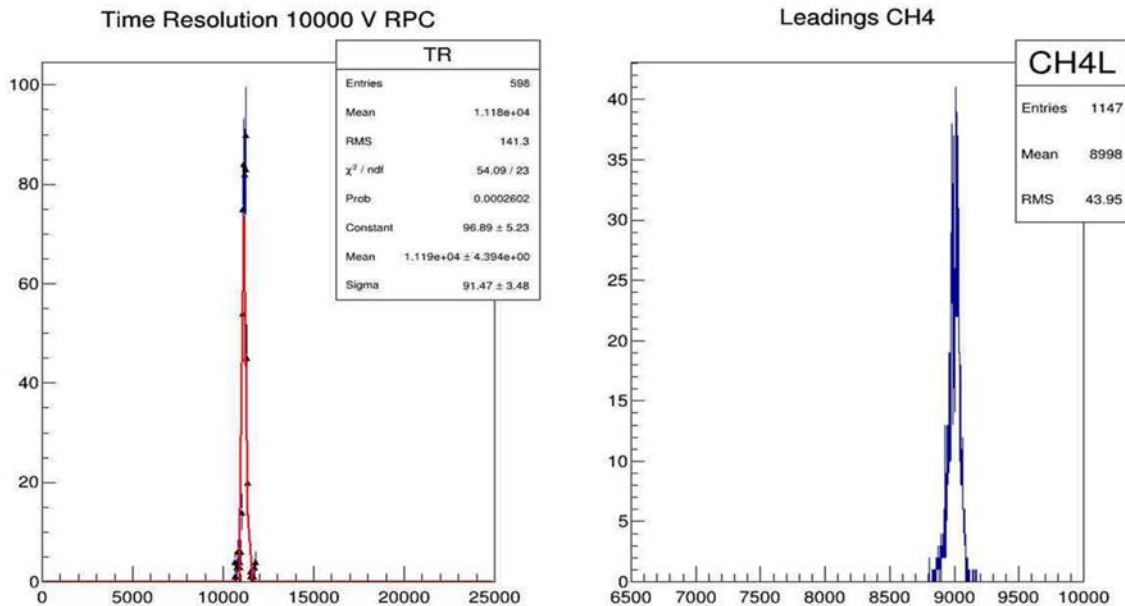


Figura 4.14: Gráfica Carga vs Tiempo obtenida para el RPC operando a 10.6 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma de hexágonos como trigger.

Resultados experimentales
4.4. Resolución temporal



FWHM 215.406

Figura 4.15: Resolución temporal obtenida de 5.38 ns para el RPC operando a 10 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

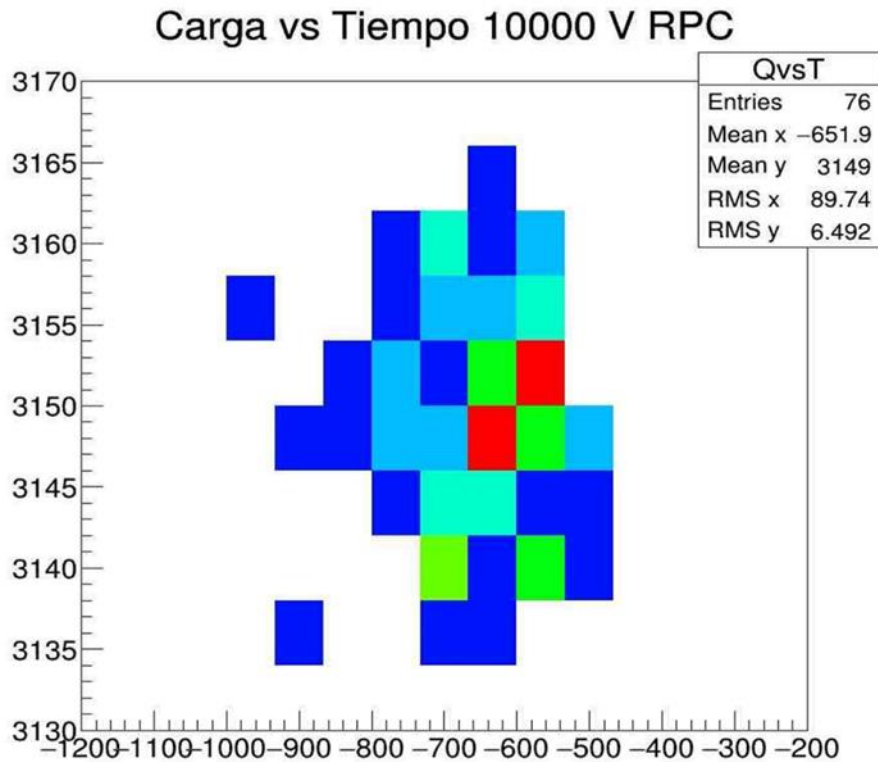
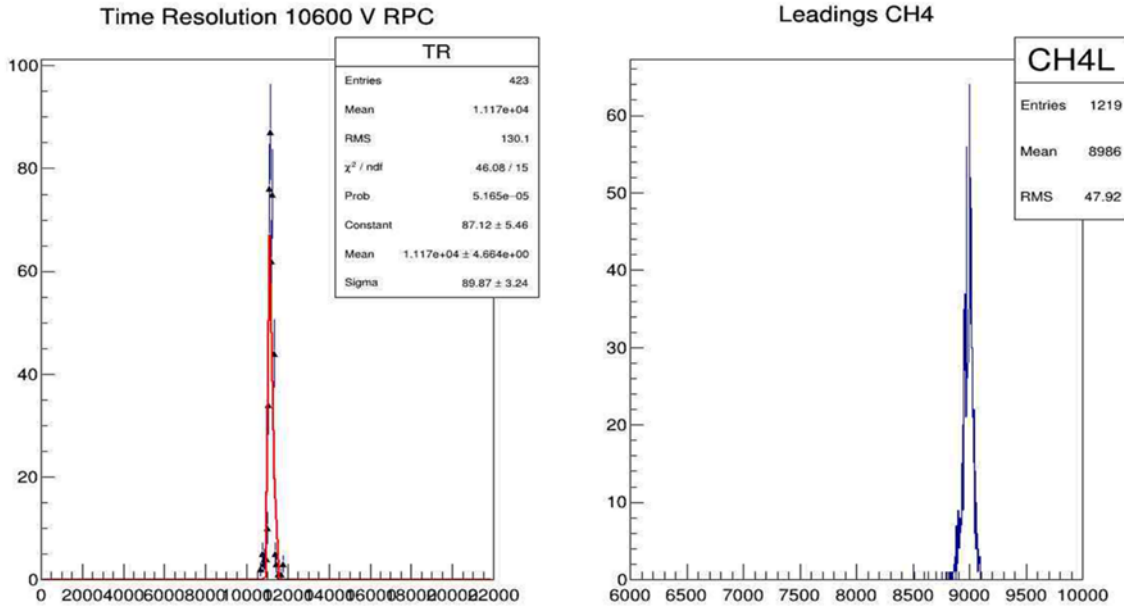


Figura 4.16: Gráfica Carga vs Tiempo para el RPC operando a 10 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.



FWHM 211.619

Figura 4.17: Resolución temporal obtenida de 5.29 ns para el RPC operando a 10.6 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

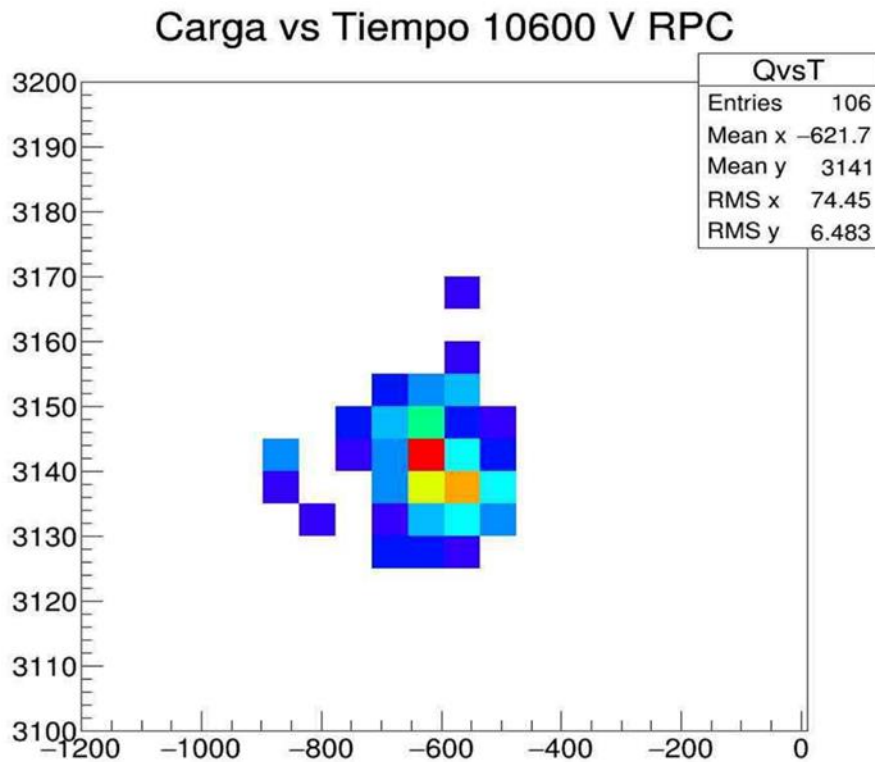
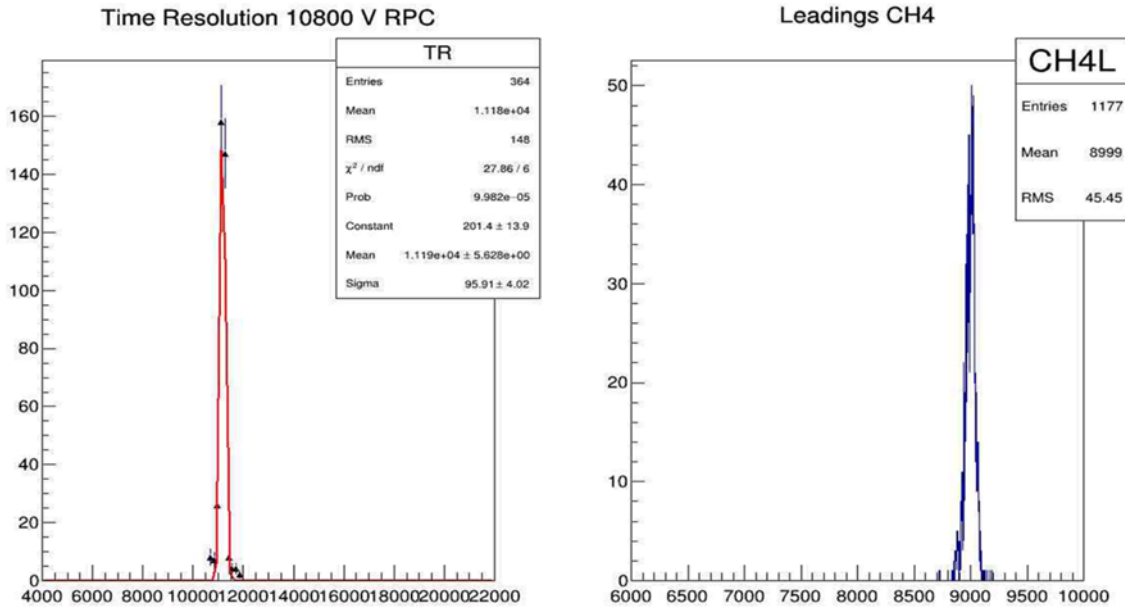


Figura 4.18: Gráfica Carga vs Tiempo para el RPC operando a 10.6 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

Resultados experimentales
4.4. Resolución temporal



FWHM 225.843

Figura 4.19: Resolución temporal obtenida de 5.6 ns para el RPC operando a 10.8 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

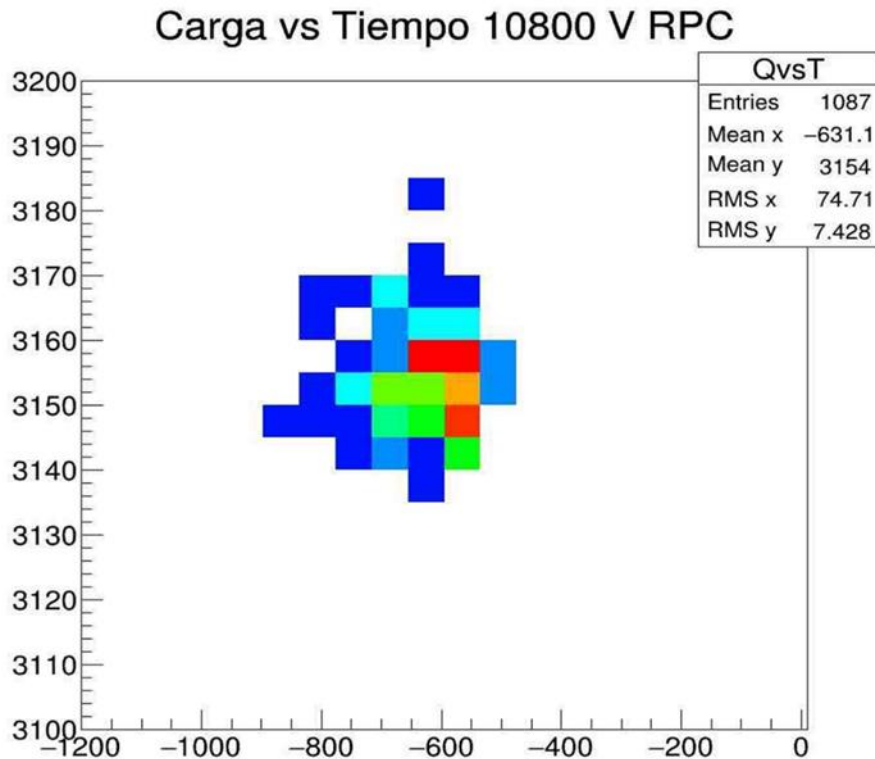


Figura 4.20: Gráfica Carga vs Tiempo para el RPC operando a 10.8 kV y utilizando dos plásticos centelladores en forma rectangular como trigger.

Capítulo 6

Conclusiones

Para concluir este trabajo de tesis se presentan algunos comentarios acerca de los retos que surgieron en el proceso de construcción del detector y las experiencias adquiridas.

Si bien el objetivo principal de esta tesis fue la construcción y la caracterización de un detector de cámaras de placas resistivas de doble gap con dimensiones de 25 cm X 25 cm, durante el proceso de construcción se aprendió que se pueden realizar detectores de mayor tamaño sin ningún tipo de problema adicional. También se aprendió que, aunque es un detector que se construye a partir de materiales fáciles de conseguir su construcción no es tan fácil como se menciona en la bibliografía consultada, ya que se requiere de bastante paciencia, limpieza, así como destreza con las manos para poder realizar todos los procesos de construcción de las piezas que requiere el detector, así como para el ensamble del detector. Pero, como conclusión podemos decir que este proceso se puede repetir las veces necesarias sin ningún problema.

Con los resultados experimentales nos podemos dar cuenta que el detector tiene las características necesarias para competir e incluso sustituir la tecnología del plástico centellador, ya que alcanza la misma eficiencia y la resolución temporal obtenida es muy buena, no es la mejor ya que este fue el primer RPC construido, y con certeza se puede decir que esta resolución se puede mejorar

Un objetivo extra que se logró fue el poder utilizar el sistema FEE y DAQ para obtener la resolución temporal y la distribución de carga del RPC.

Con la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo se ha comprendido la importancia de estos detectores gaseosos de placas resistivas, ya que como bien se dice son detectores de bajo costo, relativamente fáciles de construir y alcanzan unas resoluciones temporales muy buenas.

Bibliografía

[1] R. Santonico and R. Cardarelli, Development of Resistive Plate Chambers, Nucl. Instrum. Meth. (1981).

[2] E. Cerron Zeballos et al., A new type of resistive plate chamber: The multigap RPC, Nucl. Instrum. Meth. (1996).

[3] K. Kleinknecht, Detectors for Particle Radiation, Cambridge University Press (1998).

[4] C. Grupen, Particle Detectors, Cambridge Monographs on Particle Physics, Cambridge University Press (1996).

[5] M. Abbrescia, The dynamic behaviour of Resistive Plate Chambers, Nucl. Instrum. Meth. (2004).

[6] P. Camarri, R. Cardarelli, A. Di Ciaccio and R. Santonico, Streamer suppression with SF-6 in RPCs operated in avalanche mode, Nucl. Instrum. Meth. (1998).

[7] A.J. Davies and C.J. Evans, The Theory of Ionization Growth in Gases Under Pulsed and Static Fields (1973).

[8] H. Raether, Electron Avalanches and Breakdown in Gases, Butterworths (1964).

[9] R. Cardarelli, R. Santonico and V. Makeev, Avalanche and streamer mode operation of resistive plate chambers, Nucl. Instrum. Meth. (1996).

- [10] G. Aielli et al., Further advances in aging studies for RPCs, Nucl. Instrum. Meth. (2003).
- [11] I. Smirnov, Modeling of ionization produced by fast charged particles in gases, Nucl. Instrum. Meth. (2005).
- [12] A. Blanco, P. Fonte, L. Lopes, A. Mangiarotti, R. Ferreira-Marques, et al., Resistive plate chambers for time of flight measurements, Nucl. Instrum. Meth. (2003).
- [13] P. Fonte, Analytical calculation of the charge spectrum generated by ionizing particles in Resistive Plate Chambers at low gas gain, (2013).
- [14] M. Alviggi, V. Canale, M. Caprio, G. Carlino, R. de Asmundis, et al., First results of the cosmic rays test of the RPC of the ATLAS muon spectrometer at LHC, Nucl. Instrum. Meth. (2004).
- [15] C. Gustavino et al., Performance of glass RPC operated in avalanche mode, Nucl. Instrum. Meth. (2004).
- [16] A. Blanco et al., Progress in timing Resistive Plate Chambers, Nucl. Instrum. Meth. (2004).
- [17] D. Belver et al., "ESTRELA Front End Electronics status and upgrades for the HADES RPC Wall". Presented at XVI HADES Collaboration Meeting, Dresden, Germany, 2005.