



CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN DETECTOR DE PARTÍCULAS TIPO "RESISTIVE PLATE CHAMBER"

Diana Marcela Coy Mondragón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia

2014

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN DETECTOR DE PARTÍCULAS TIPO “RESISTIVE PLATE CHAMBER”

Diana Marcela Coy Mondragón

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al
título de:

Magister en Ciencias - Física

Director :

Héctor Fabio Castro Serrato, Ph.D

Línea de Investigación:

Detectores

Grupo de Investigación:

Cryomag

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia

2014

*A las personas que han hecho todo en la vida
para que pueda lograr mis sueños.*

*La verdad puede ser desconcertante.
Entenderla nos puede llevar algún tiempo.
Puede no ser intuitiva. Puede contradecir
prejuicios profundamente arraigados.
Puede ser no consonante con aquello
que más deseamos que sea la verdad.
Pero nuestros gustos no determinan
la realidad.*

Carl Sagan

AGRADECIMIENTOS

A Dios creador del universo por permitirme construir otros mundos mentales posibles.

Este trabajo fue desarrollado con la colaboración de varias personas que asiduamente han contribuido en mi formación profesional.

Quiero agradecer a mi director de trabajo. PhD. Héctor Fabio Castro por guiarme en el camino correcto para comprender el mundo de física y por su confianza en la realización de este trabajo, a la Universidad Nacional de Colombia por haberme permitido realizar mis estudios de Maestría en Física, a profesores y compañeros que durante el transcurso de la carrera me difundieron sus conocimientos, a Colciencias por la financiación parcial de este trabajo mediante el PROYECTO No. 110152129367 y al grupo de trabajo del Taller de Mecánica Fina del Departamento de Física.

Muy en especial a mis padres Martha y Pablo por respetar mis decisiones sin importar los sacrificios, a mi hermana Tathiana por acompañarme a descubrir el mundo de la ciencia, a mi hermano Germán por su apoyo.

A Juan Camilo Sebastián Andrés por ser parte importante en mi vida, por su apoyo, ayuda y amor incondicional.

Extiendo mis agradecimientos, a todos aquellos que en estos años de vivencia han permitido, favorecido y propiciado mi aprendizaje y me han enseñando que por encima de las diferencias, siempre estarán las personas.

A los lectores de este trabajo, por sus comentarios y sugerencias.

RESUMEN

Se diseñó, construyó y caracterizó un detector gaseoso de partículas tipo “Resistive Plate Chamber”(RPC) en el laboratorio del grupo Cryomag del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Inicialmente se completó la etapa de diseño donde se escogieron los materiales y las dimensiones convenientes para su funcionamiento; se construyó el sistema electrónico que recoge los pares ion-electrón que genera la señal electrónica y simultáneamente se realizó la adecuación de instalaciones e infraestructura necesarias. Se ensambló el detector y se realizaron las modificaciones necesarias para corregir las fallas en la construcción para su funcionamiento. Finalmente se caracterizó utilizando las técnicas convencionales de instrumentación con radiación cósmica (muones) la cual nos permite conocer la curva de respuesta del detector y la curva de conteo en función del voltaje, determinando así el voltaje óptimo de operación y su ganancia para cada uno de los diferentes gases : 100 % Aire, 100 % Ar, 100 % CH₄ y 90 %Ar+10 %CH₄. El análisis de la curva característica permitió concluir que el detector funciona en la región proporcional con ganancia del orden de 10^6 y que la mezcla P10 en comparación a los otros gases presenta mayor rango de voltaje de operación (1070 V-1700 V) sin presentar chispas. Por otro lado, la curva de conteo se observa, que los voltajes en donde hay conteo de 100 muones por minuto, se encuentran en una región de ganancia estable, que es apropiado para realizar mediciones.

Palabras Claves: RPC: Resistive Plate Chamber, Muones, Voltaje, Detector gaseoso.

ABSTRACT

A gaseous particle detector type "Resistive Plate Chamber" (RPC) is designed, constructed and characterized in the laboratory of Cryomag group in the physics department of the National University of Colombia in Bogotá.

Initially the design stage where suitable materials and dimensions were chosen for their operation is completed; electronic system that collects the ion-electron pairs that generates the electronic signal was constructed and simultaneously the adequacy of facilities and infrastructure necessary was performed. The detector was assembled and the necessary modifications were made to correct the flaws in the construction for operation. Finally was characterized using conventional instrumentation techniques with cosmic radiation (muons) which lets us know the response curve of the detector and curve counting function of voltage, thus determining the optimum operating voltage and gain for each different gases: 100% air, 100% Ar, 100% CH₄ and 90% Ar +10% CH₄. The characteristic curve analysis showed that this detector works in the proportional region with a gain of about 10^6 and the P10 mixture compared to the other gases has increased operation voltage range (1070 V-1700 V) without making sparks. For other side in the counting curve is observed that the voltages where counting of 100 muons per minute, are found in a region of stable gain, which is appropriate for performing measurements.

Keywords: RPC: Resistive Plate Chamber, Muon, Voltage, gas detector.

Índice general

	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
INTRODUCCIÓN	1
ESTADO DEL ARTE	2
OBJETIVOS	4
1. Marco Teórico	6
1.1. Detectores	6
1.1.1. Clasificación de los detectores de partículas	7
1.1.2. Magnitudes características de los detectores	8
1.1.2.1. Sensibilidad	8
1.1.2.2. Respuesta	9
1.1.2.3. Resolución energética	9
1.1.2.4. Tiempo de respuesta.	11
1.1.2.5. Eficiencia	11
1.1.3. Detectores de Ionización Gaseosos	12
1.1.3.1. Curva Característica de respuesta	13
1.1.3.2. Fenómenos de ionización	15
1.1.3.3. Transporte de iones y electrones en gases	16
1.1.4. Multiplicación de avalancha	18
1.1.5. Gas de llenado	20
1.1.6. Detector Resistive Plate Chamber "RPC"	20
1.1.6.1. Principio básico de operación	21
1.1.6.2. Modos de operación	23

ÍNDICE GENERAL

1.1.6.3.	Clasificación de los RPC	25
1.1.6.4.	Diseños del RPC	26
1.1.6.5.	Aplicaciones	29
1.2.	Muones Cósmicos	29
2.	EXPERIMENTO	32
2.1.	Diseño y Construcción	32
2.1.1.	Caja de acrílico	33
2.1.2.	Modelo eléctrico	34
2.1.2.1.	Electrodos	34
2.1.2.2.	Espaciadores	37
2.1.3.	Gases de llenado	37
2.1.4.	Montaje experimental	39
2.1.4.1.	Lectura y tratamiento de los datos	39
2.1.4.2.	Módulos electrónicos para el procesamiento de señales.	39
2.1.5.	Metodología experimental	42
2.2.	Caracterización	43
2.3.	Resultados y discusión	43
2.3.1.	Análisis de pulsos	43
2.3.2.	Curva Característica de repuesta	47
2.3.3.	Curva de Conteo	52
	CONCLUSIONES	55
	APÉNDICES	56
A.	Calculo del Número de Electrones	56
	APÉNDICES	57
B.	dE/dX para Muones	58
	BIBLIOGRAFÍA	60

Índice de figuras

1.1. Funcionamiento de un detector de ionización gaseoso. Bajo la influencia del campo eléctrico los electrones y los iones positivos se desplazan hacia los electrodos [20].	12
1.2. Modelo general de un detector de ionización gaseoso [18].	13
1.3. Número de electrones en la señal producida por una partícula de ionización mínima en un contador. Los diferentes regímenes de funcionamiento del contador en función del voltaje [21].	14
1.4. Velocidad de deriva de un electrón en función del campo eléctrico E dividido por la presión del gas p [19].	18
1.5. Formación de avalancha. Los electrones se mueven más rápido que los iones positivos, de manera que la avalancha tiene la forma de gota [19].	19
1.6. Esquema de un RPC simple [29]. Los electrodos planos son hechos de un material resistivo (normalmente de vidrio o de baquelita) y están conectados a una fuente de alimentación de alta tensión. Una capa fina de grafito recubre la superficie externa de los electrodos, que se mantienen separados por medio de pequeños espaciadores de alta resistividad.	22
1.7. Imágenes esquemáticas del desarrollo de la avalancha en un RPC [37]. Algunos átomos del gas son ionizados por el paso de una partícula cargada entre el gap. Se inicia una avalancha influenciando el campo eléctrico, los electrones alcanzan la placa del ánodo y los iones alcanzan el cátodo.	24
1.8. Imágenes esquemáticas del desarrollo del modo streamer en un RPC [37]. Se inicia con el desarrollo de una avalancha, donde las cargas de avalancha distorsionan de campo eléctrico y los fotones de mayor energía comienzan a contribuir con el desarrollo de avalancha y causan una rápida propagación de ella. Puede crearse una chispa débil en esta etapa.	25
1.9. Esquema de un RPC con doble gap [36].	26
1.10. Esquema del RPC multigap [37]	27
1.11. Esquema de un RPC Híbrido [38]	28
1.12. Esquema simplificado de un Micro Rpc [41].	28
1.13. Flujos verticales de los rayos cósmicos en la atmósfera. Los puntos muestran mediciones de muones negativos con energía menor a 1 GeV [50].	31

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Diseño del RPC. El detector consta de dos electrodos de baquelita, separados por espaciadores de plástico. La superficie externa de cada placa se encuentra los strip, que recogen la señal del detector y en la superficie interna, se aplica pintura de grafito que permite la aplicación uniforme del alto voltaje. Las placas de strips están orientadas en direcciones ortogonales para obtener mediciones en ambos planos.	33
2.2. Diseño de la caja de acrílico	34
2.3. Configuración del circuito eléctrico del RPC. La fuente de alto voltaje se conecta a los electrodos, la conexión positiva a la placa superior y la conexión a tierra a la placa inferior. R es la resistencia de protección.	34
2.4. Diseño de la superficie externa de los electrodos, conformado por 10 strips acoplados y separados a 1 mm de distancia.	35
2.5. Diseño de la superficie interna de los electrodos. Se recubrió con pintura de grafito, para permitir la aplicación uniforme del alto voltaje. En el extremo inferior de la placa se coloca una lámina de cobre para soldar las conexiones de alto voltaje (HV) y de tierra.	36
2.6. Circuito impreso de los electrodos, consta de 10 strips comentados en paralelo. Se diseño en el programa EAGLE y posteriormente se imprimio sobre la baquelita.	36
2.7. Tornillos y tuercas plasticas.	37
2.8. Imágenes del detector RPC ensamblado. a. Vista superior del RPC. b. Vista inferior del RPC. Los strips están orientados perpendicularmente con respecto a los de la placa superior. c. Vista lateral del RPC. Se puede apreciar el gap entre los electrodos debido a los espaciadores y el racor para la salida del gas. d. Se identifica el O-ring y los tornillos plásticos que acoplan los electrodos. e. Se observa el conector de alto voltaje y la señal de salida del conjunto de strips inferior. f. Se muestra el racor del entrada del gas y el conector de señal de salida del conjunto de strips superior.	38
2.9. Montaje experimental. Se muestra el rack de instrumentos. 1. Osciloscopio. 2. Electrónica estándar NIM. 3. Flujómetros. 4. Soporte para el detector. 5. Sistema de control de flujo de gas, flujómetro DWYER escala: 0.06-0.5 l/min, Flujometro Vogtlin escala: 0 – 10 N l/h, manómetros y gas de argón y metano.	40
2.10. Módulos electrónicos para el procesamiento de señales. 1. Contador. 2. Fuente de alto voltaje. 3. Amplificador. 4. Discriminador. 5. Fuente de alimentación para el preamplificador 6. Preamplificador.	41
2.11. Configuración experimental para la caracterización.	42
2.12. Configuraciones experimentales para caracterización del detector. a. Configuración experimental para observar los pulsos del RPC. b. Configuración experimental para obtener la curva característica. c. Configuración experimental para obtener conteo de muones.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

2.13. a. Formación de la señal en el RPC. Se induce una señal de polaridad negativa en los strips cercanos al cátodo y la señal de polaridad positiva a los strips cercanos al ánodo. b. Pulsos observados en el osciloscopio a 5 mV/div, 100 ns/div y trigger de -9,0 mV.	45
2.14. Pulsos para diferentes gases a 5 mV/div, 100 ns/div y trigger de -9, mV. a. Pulso para 100 % Aire-polaridad negativa para 1510V. b. Pulso para 100 % Argón-polaridad negativa para 1510V. c. Pulso para 100 % Metano-polaridad negativa para 1510V. d. Pulso para P10-polaridad negativa para 1510V. e. Pulso para 100 % Aire-polaridad positiva para 1510V. f. Pulso para 100 % Argón-polaridad positiva para 1510V. g. Pulso para 100 % Metano-polaridad positiva para 1510V. h. Pulso para 100 % P10-polaridad positiva para 1510V.	46
2.16. Señal del RPC obtenida con el preamplificador a 200 mV/div, 500 μ s/div. La altura del pulso representa la carga integrada del pulso de salida del detector.	47
2.15. Gráficas de Altura del pulso (polaridad negativa) vs Voltaje con diferentes gases. Se observa la proporcionalidad de la altura del pulso con el voltaje aplicado. a. En el rango 1900-2030 V se observa un gran aumento del pulso y se presentan regiones donde se mantiene estable como:1600-1650 V b. En el rango 1380-1600 V se presenta un aumento leve, mientras que de 1600-1750 V se presenta un notable incremento del pulso. c. Un incremento lineal se observa en el rango de 1230-1510 V mientras que de 1740-1770 V el pulso aumenta notablemente. d. En la región de 1260-1690 V se presenta un aumento lineal de la altura del pulso. P10 presenta el mayor rango de linealidad.	48
2.17. Número de Electrones colectados en función del Voltaje para cada gas. Las ganancias obtenidas para cada gas, son del mismo orden de magnitud 10^6 y se puede concluir que el detector opera en la región de contador proporcional.	50
2.18. Gráfica de Cuentas en función de V_{THR} para cada gas a un voltaje constante para Aire de 1800V, Argón de 1500V, Metano de 1500V y P10 de 1300V.	52
2.19. Cuentas por minuto en función del voltaje para cada gas. Se observa que a medida que se aumentan la tensión aplicada, el número de muones detectados es mayor.	53
B.1. Gráfica dE/dX para muones.	59

Índice de tablas

1.1. Características de ionización y excitación para varios gases [19].	15
1.2. Movilidad de iones para algunos gases [18].	18
1.3. Resumen de las aplicaciones del RPC en los experimentos pasados y actuales [29]	29
2.1. Rangos de voltaje de operación para cada gas.	47
2.2. Ganacias de cada gas en zonas de estabilidad	52

INTRODUCCIÓN

Los experimentos de altas energías realizados en el CERN (European Organization for Nuclear Research), Ginebra, han sido encaminados con el fin de estudiar regímenes de energía nunca antes explorados. Esto no solo nos acerca al anhelado conocimiento del sector de Higgs, la fase de parton formada en las colisiones de iones pesados, sino también la comprensión de la violación-CP. Hay una búsqueda continua (hasta ahora sin éxito) para la evidencia de las partículas súper simétricas que podrían explicar la materia oscura que necesita nuestro modelo cosmológico actual, junto con una serie de extensiones del modelo estándar. El tipo de detector gaseoso denominado “Resistive Plate Chamber”, o RPC juega un papel fundamental en este avance científico mundial, debido a sus propiedades y la capacidad de adaptación a las necesidades de los experimentos en diferentes áreas [1].

En el experimento CMS (Compact Muon Solenoid) del LHC (Large Hadron Collider); el RPC se utiliza en la detección y determinación de la trayectoria de muones y fue escogido por la altura del pulso (grande), bajo costo por unidad de superficie y buena resolución temporal (aproximadamente 50 ps)[2]. Este campo ha gozado de grandes progresos en los últimos años, incluyendo la ampliación de tasa conteo alrededor de 10 MHz/cm² y eficiencias de 97% [3]. Estos nuevos desarrollos han sido implementados en física médica en imágenes de calorimetría, para la aplicación de Algoritmos de flujos de partículas (ALP) [4], en tomografía por emisión de positrones (PET) [5, 6] entre otros. Sin embargo, a pesar de que estos detectores son aceptables para realizar mediciones, el tema de investigación aún sigue abierto en pro de la optimización del prototipo alcanzando tiempos de respuestas más rápidos y eficiencias mayores.

Este proyecto está encaminado con miras a iniciar investigación en este campo aportando la primera etapa que es la fabricación y caracterización de un detector RPC. Además el grupo Cryomag de la Universidad Nacional de Colombia está participando en el proyecto RD51 Proyecto Internacional de colaboración para el desarrollo detectores gaseosos con el CERN y por este el empeño en iniciar investigación, con el objetivo a largo plazo de realizar aportes a este tipo de detectores.

ESTADO DEL ARTE

El campo de trabajo para los detectores gaseosos comenzó hace un siglo cuando H. Geiger E. Rutherford y W. Mueller comenzaron a implementar sus conocimientos en descargas en gases con la finalidad de construir un dispositivo que detecte partículas cargadas, este dispositivo es conocido como el contador de Geiger-Muller[3, 7, 8]. En la actualidad la detección de partículas se ha modificado y la medición es puramente electrónica con estructuras grabadas en circuitos impresos proporcionando mejoras en resoluciones, por ejemplo, de tiempo (picosegundos), espacio de reconstrucción (micrómetros), y energía (eV de rayos γ). Los detectores de partículas, han contribuido significativamente al avance de la ciencia y nuevas técnicas de detección, como cámaras de niebla, cámaras de burbujas, Multi-Wire Proportional Chamber, Resistive Plate Chamber (RPC), y Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD) han permitido descubrimientos esenciales. El desarrollo de nuevas técnicas en este campo fue reconocido por un número de Premios Nobel (CTR Wilson, la cámara de niebla, 1927; P. Cherenkov, I. Frank, I. Tamm, el efecto Cherenkov, 1958; D. Glaser, cámara de burbujas, 1960, L. Alvarez, cámara de burbujas de análisis, 1968; G. Charpak por MWPC, 1992; R. Davis, M. Koshiba, la detección de neutrinos, 2002)[9]. En la década de los sesenta se construyó el contador proporcional conocido como Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC) desarrollado por G. Charpak, donde los electrodos de placas fueron reemplazados por alambres paralelos con el fin de reducir la dispersión múltiple, pérdida de energía e interacciones secundarias; la idea del contador de Geiger-Müller fue retomado, desarrollando detectores modernos, más precisamente en los MWPC los cuales abrieron la puerta a un gran rango de aplicaciones que hoy día han sido optimizadas [10]. Con los avances tecnológicos se inició una nueva era en el diseño de dispositivos ahora conocidos como Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD); donde los MWPC se simplifican y su estabilidad y flexibilidad mejoran si los ánodos se construyen en forma de bandas o puntos sobre superficies aislantes o semiconductoras en lugar de estirar los alambres en el volumen determinado. El Gas Electron Multiplier (GEM) y el MICRO MESH Gaseous Structure (MICROMEGAS) son los dos más representativos y utilizados en diferentes experimentos [11].

El primer detector de gas en mejorar la resolución temporal con intensos campos eléctricos uniformes fue el Keuffel Spark Counter (KSP) en 1948 [10], que consistía en dos electrodos de metal con geometría de placas paralelas, su desventaja era que se producía corto circuito

entre los electrodos y era necesario utilizar un circuito de desconexión. Para superar estos problemas, un nuevo tipo de cámara de chispa, introdujo electrodos de placas resistivas y mezclas de gases especiales para la absorción de fotones en 1971 [12]. El primer detector de electrodos resistivos fue Planar Spark Chamber (PSC), construido por Pestov [10] con un gap de 0.1 mm logrando una resolución temporal de 25 ps. El gap era muy delgado y combinado con altos valores de campo eléctrico (500 kV/cm) exigía una superficie uniforme de los electrodos y tenía que ser operado con presiones altas (12bar). Posteriormente se construyó el Parallel Plate Avalanche Chamber (PPAC), un detector gaseoso muy similar al contador de chispa con un gap y con dos electrodos planos de metal, o metalizado de cerámica o de plástico, separados por espaciadores a una distancia fija de 0.5 a 2 mm. Sus ventajas incluían rápida respuesta y una mayor capacidad de velocidad de hasta 10 MHz/cm². La resolución de tiempo es de 100 a 250 ps. Dependiendo de la mezcla de gas utilizado [10, 11].

El detector RPC fue desarrollado por Santónico en el año 1981, utilizó electrodos de baquelita, separados a una distancia (o gap) de 1.5 mm y con una mezcla de gas de argón e isobutano a presión atmosférica. Su eficiencia fue del 97% y tiempo de resolución aproximadamente de 1ns [7]. En los primeros diseños de RPC, también se utilizó vidrio en los electrodos, pero por el alto costo su aplicación fue limitada, por esta razón los RPC recientes utilizan baquelita y otros polímeros en lugar de los vidrios resistivos [13]. Este prototipo ha sido intensamente estudiado por muchos científicos durante los últimos años y ha sido propuesto e implementado como tecnología adecuada para la construcción del sistema de detección de muones en los experimentos del LHC por su excelente tiempo de resolución, facilidad de operación y su bajo costo de construcción [14]. Fue implementado en el año 1985 en Nadir ($n\text{-}\bar{n}$ oscillation) – 120 m² (Triga Mark II – Pavia) y en 1990 en Fenice ($J/\psi \rightarrow n\text{-}\bar{n}$) – 300 m² (Adone – Frascati), WA92 – 72 m² (CERN SPS) : E771– 60 m²; E831 – 60 m² (Fermilab). De 1994 a 1996 en L3 – 300 m² (CERN-LEP) y de 1996 a 2002 en BaBar – 2000 m² (SLAC) [1].

Pronto, se introdujo la estructura de la doble gap para mejorar la eficiencia de detección, junto con el modo de operación avalancha, que extiende sus capacidades de tasa de conteo. Las ventajas con respecto al RPC de un solo gap es que permite ser operado con voltajes más bajos y presenta mejor distribución de la carga pero su costo es mayor por unidad de área sensitiva [15].

En 1996 fue introducido el "RPC multigap", con el objetivo de mejorar la resolución de temporal, manteniendo las ventajas del RPC. Esta estructura consiste básicamente en que a un gap de un RPC convencional se le agregan algunas placas resistivas internas para dividirlo en sub-gaps donde se han alcanzado tiempos de resolución de 50 ps y eficiencia del 98% [12]. Con la elección adecuada de la mezcla de los gases los RPC puede operar en modo avalancha o en modo streamer. Los RPC modernos que trabajan en el modo de uso avalancha principalmente mezclas de tetrafluoroetano (CH₂H₆F₄) con 2 a 5% de isobutano (iso-C₄H₁₀) y 0.4% a 10% de hexafluoruro de azufre (SF₆). La adición de SF₆ se

ha demostrado que se extiende la región de operación a streamer, las mezclas más comunes son de argón con isobutano y tetrafluoroetano en proporciones variables [3].

Las cámaras operadas en el modo de streamer producen grandes señales, que son fáciles de discriminar mientras que las que funcionan en modo avalancha reducen la carga producida durante la multiplicación, por lo tanto se puede lograr una mejor tasa de conteo y tienen buena estabilidad a largo plazo en cuando son altamente irradiadas [16].

Este prototipo de detector ha sido implementado en experimentos de rayos cósmicos en modo streamer como COVER PLAXTEX y EAS-TOP. También han sido utilizados en experimentos de física de altas energías como L3 en el CERN, BABAR en el SLAC, EE.UU, BELLE en KEK, Japón, en ATLAS en modo avalancha para el sistema de trigger y ALICE en el modo streamer en el sistema BESIII MOUN para el experimento del LCH [17].

Estos nuevos desarrollos han ampliado aún más la gama de sus aplicaciones en experimentos de física de partículas y ha abierto nuevas y diversas aplicaciones, tales como imágenes médicas, calorimetría, tomografía de emisión de positrones (PET) [5] y rastreo de alta velocidad para Partículas de Mínima ionización (MIP) [3].

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y caracterizar un detector gaseoso de partículas tipo Resisitive Plate Chamber (RPC) en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia.

Objetivos Específicos

1. Revisión bibliográfica de los fundamentos físicos de los detectores gaseosos de partículas haciendo énfasis en las características de los detectores tipo RPC.
2. Diseñar y construir un prototipo de detector RPC (descripción de la geometría, selección de materiales y el gas, fabricación del detector).
3. Definición y esquematización de la infraestructura requerida para el manejo del detector (soportes mecánicos, alimentación y control de gas, etc).
4. Plantear y ensamblar el sistema de tratamiento y adquisición de señales electrónicas a partir de módulos existentes (NIM).
5. Pruebas de funcionamiento del prototipo con diferentes gases.
6. Caracterización del prototipo para cada gas. Se determinará el voltaje de operación óptimo, la curva característica de respuesta y la curva de conteo con radiación cósmica (muones).

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Detectores

Las partículas subatómicas cargadas pueden ser detectadas por sus interacciones electromagnéticas con la materia. Las partículas neutras subatómicas sólo se puede detectar si primero se someten a una interacción. Las partículas cargadas producidas en la interacción pueden revelar que una partícula neutra estuvo presente.

Hoy en día existen tres métodos principales para la detección de partículas subatómicas: la detección basada en la ionización del gas, la detección basada en semiconductores y de detección basada en centelleo. Todos estos métodos se basan en la detección de ionización de átomos o la excitación de átomos producidos por la interacción de Coulomb de las partículas cargadas con el medio [18].

Años atrás, se utilizaron varios métodos de detección útiles, tales como cámaras de burbujas y cámaras de niebla, pero que han quedado obsoletos debido a que estos métodos no permiten aprovechar los avances en la electrónica.

Una de las aplicaciones más importantes del estudio del paso de las radiaciones a través de la materia ha sido el desarrollo de instrumentos de detección de alta precisión que permiten determinar la densidad y la trayectoria de las diferentes manifestaciones de radiación dentro de un medio material. Estos mecanismos se aplican al conteo de partículas radiactivas que atraviesan un punto y a su seguimiento a través de trazas dibujadas sobre un fondo gaseoso o emulsionante [16, 19].

1.1.1. Clasificación de los detectores de partículas

- Detectores eléctricos. Los e^- emitidos por la ionización son acelerados por un potencial y a su vez producen más ionización, con lo cual la señal final es amplificada. Si el medio es un gas, funcionan por las descargas en gases (cámaras de ionización, contadores proporcionales, tubos de Geiger-Müller). En los cristales son los pares e^- - hueco, creados por el paso de la partícula los que determinan la señal.
- Contadores de centelleo y Cherenkov. Las partículas cargadas excitan los átomos del medio. La emisión luminosa producida por la desexcitación es convertida en pulso eléctrico por efecto fotoeléctrico y amplificada en un fotomultiplicador.
- Detectores de trazas. la trayectoria de la partícula se hace visible; por ejemplo, en cámaras de niebla o de Wilson, de burbujas, de chispas, emulsiones, etc.

La manera de poder detectar partículas neutras es conseguir que interaccionen con el detector y que se produzcan en el estado final partículas cargadas. Gracias a la detección de las partículas cargadas (secundarias) se podrán reconstruir las características de la partícula neutra incidente. Los detectores que se diseñan para partículas neutras deben ser sensibles a las interacciones siguientes:

- Si se quieren detectar fotones (γ), hay que aprovechar la interacción electromagnética de dichos fotones, es decir, el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton o creación de pares.
- Si se quiere detectar neutrones (n), hay que utilizar la interacción fuerte, por ejemplo, la colisión elástica $np \rightarrow np$ de forma que el protón adquiere energía y es el que se detecta.
- Si se pretenden detectar neutrinos (ν), debe existir previamente interacción débil. Pero es sólo posible si se dispone de flujos muy intensos, ya que la probabilidad de interacción de un neutrino es muy pequeña.

La información que proporcionan los detectores es muy variada, algunas de las magnitudes que se pueden medir son:

- Conteo. Es útil, por ejemplo, para medir actividades de fuentes radiactivas.
- Identificación, o sea, conocer la masa. En detectores de trazas, normalmente la traza es debida a la ionización, que es una función $f(\beta, Z)$, de la velocidad de la partícula y de su carga eléctrica. Además suele ser utilizado un campo magnético \vec{B} , que curva la trayectoria de las partículas en función de su momento. También puede identificarse una partícula gracias a los detectores Cherenkov.
- Energía, midiendo alcances en detectores de trazas, o a más altas energías en calorímetros.

- Secciones eficaces de interacción o vidas medias; midiendo las longitudes medias de interacción λ_I o de desintegración λ_D en detectores de trazas.
- Dirección y tiempo de paso, con detectores de trazas, y utilizando técnicas de coincidencias.
- Flujo, contando número de partículas [11, 20, 21].

1.1.2. Magnitudes características de los detectores

No existe un detector de partículas universal; para cada tipo de partícula y, dependiendo del rango de energías, interesa un tipo distinto. Existen varias propiedades físicas de los detectores que conviene analizar antes de decidir su uso [20].

1.1.2.1. Sensibilidad

La sensibilidad de un detector es su capacidad para producir una señal medible para un determinado tipo de radiación y energía. Ningún detector es sensible a todo tipo de radiación en todas las energías. En su lugar, están diseñados para ser sensibles a ciertos tipos de radiación en un rango determinado y dependen de la sección eficaz de las reacciones ionizantes dentro del detector, la masa, el ruido y el material protector que rodea su volumen sensible [19, 21].

La sección eficaz y la masa del detector determinan la probabilidad de que la radiación incidente convierta la totalidad o una parte de su energía en ionizaciones, en otras palabras ambas determinan la probabilidad de interacción de la partícula en el medio del detector. Los detectores con poca masa detectarán una pequeña parte de la radiación y serán poco sensibles a partículas neutras.

Por el contrario el material envolvente del detector y el ruido (del detector y de la electrónica) fijarán el mínimo de señal detectable [20]. El ruido aparece como corriente o voltaje fluctuando en la salida del detector y siempre está presente así no incida radiación. Sin embargo, la señal de ionización es mucho más grande que la señal de ruido. Para un tipo de radiación en un rango de energía dado, la cantidad de ionización producida está determinada por el volumen sensitivo.

Otro factor limitante, es el tipo de material que cubre la región sensitiva del detector porque puede absorber la radiación y solamente lo penetraría la que tenga suficiente energía, de manera que el espesor del material determina un límite de energía mínima en la radiación para pueda que ser detectada [18, 19].

1.1.2.2. Respuesta

Además de detectar radiación, la mayoría de detectores también son capaces de proporcionar información sobre su energía. Si un detector absorbe radiación, su ionización da una medida de la energía de dicha radiación.

En general, la señal de salida para los detectores eléctricos es a través de pulsos de corriente. La cantidad de ionización es entonces reflejada en la carga eléctrica contenida en una señal, es decir, la integral del pulso con respecto al tiempo. Asumiendo que la forma del pulso no cambia de un evento a otro, esta integral es directamente proporcional a la amplitud o altura del pulso de la señal, de manera que es una característica que puede ser utilizada.

La relación entre la energía de la radiación y la carga total o altura del pulso de la señal de salida hace referencia a la respuesta del detector. Idealmente, se esperaría que esta relación fuera lineal pero para muchos detectores la respuesta es lineal o aproximadamente, en un cierto rango de energías [19].

Para una partícula que al atravesar un detector pierde una cantidad de energía E_{rad} , la respuesta del detector se define como:

$$\rho = \frac{E_{rad}}{V} \quad \text{o} \quad \rho = \frac{E_{rad}}{Q}, \quad (1.1)$$

siendo V o Q la señal (en voltaje o carga) del detector [21].

1.1.2.3. Resolución energética

En los detectores diseñados para medir energía de la radiación incidente, el factor más importante es la resolución energética. Esta es la medida en que el detector puede distinguir dos energías cercanas y puede ser medida, incidiendo sobre el detector un haz monoenergético de radiación y observando el espectro resultante. Generalmente lo que se observa es una estructura de pico con un ancho definido y en forma de Gaussiana; este ancho se presenta debido a las fluctuaciones en el número de ionizaciones y las excitaciones producidas.

La resolución está dada en términos de *Full Width at Half Maximum (FWHM)* del pico. Si se define el ancho como ΔE entonces la resolución relativa para la energía E , es

$$\text{Resolución} = R = \frac{\Delta E}{E}. \quad (1.2)$$

En general, la resolución es una función de la energía depositada en el detector. Para detectores delgados (en los que la pérdida de energía por unidad de recorrido dE/dx es pequeña), el número de ionizaciones N_{\pm} es pequeño entonces se aplica la estadística de

Poisson, con lo que, partiendo de $N_{\pm} = E/w$, siendo w la energía necesaria para crear un par e^-X^+ se tiene que $\sigma^2 = N_{\pm}$, de manera que la resolución de energía viene dada por el error estadístico que se tiene sobre la determinación de N_{\pm} :

$$R = \frac{\Delta E}{E} = 2,35 \frac{\sqrt{N_{\pm}}}{N_{\pm}} = 2,35 \sqrt{\frac{w}{E}}, \quad (1.3)$$

puesto que $\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma = 2,35\sigma$.

En la formula de behte-bloch el cálculo de la energía transferida es parametrizada en términos del momento transferido. Esto es más realista ya que el momento transferido es una cantidad medible mientras que el parámetro de impacto no lo es. La fórmula obtenida es entonces

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e C^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 \nu^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta \right], \quad (1.4)$$

es la expresión básica utilizada para los cálculos de la pérdida de energía. En la práctica, sin embargo, normalmente se añaden dos correcciones: el efecto de la densidad de corrección S, y la corrección de shell C, por lo que

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e C^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 \nu^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta - \delta - 2\frac{C}{Z} \right], \quad (1.5)$$

con $2\pi N_a r_e^2 m_e C^2 = 0,1535 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$, I : potencial de ionización, Z : número atómico del material absorbente, A : peso atómico del material absorbente, z : carga de la partícula incidente, $\beta = \nu/c$ de la partícula incidente, δ : corrección de densidad, C : corrección de capa y W_{max} : máxima energía transferida en una colisión, que esta dado por $W_{max} \simeq 2m_e c^2 \eta^2$.

Para energías no relativistas, dE/dx esta dominado por el factor $1/\beta^2$ y disminuye cuando aumenta la velocidad al alrededor de $\nu = 0,96c$, donde se alcanza un mínimo y este punto se conocen como mínimo de ionización. El valor mínimo de dE/dx es casi el mismo para todas las partículas de igual carga. A medida que aumenta la energía por encima del punto de ionización, el término $1/\beta^2$ se vuelve casi constante y dE/dx aumenta debido a la dependencia logarítmica. Para energías por debajo del valor mínimo de ionización, cada partícula presenta una curva de dE/dx que, en la mayoría de los casos, es distinta para cada tipo de partícula. Esta característica es a menudo explorada en la física de partículas como un medio para la identificación de partículas en rangos de energía. Para los muones la gráfica dE/dx versus E se puede ver Apendice B.

Siguiendo a Fano se cumple $\sigma^2 = FN_{\pm}$, siendo F el factor de Fano, que es un función de todos los procesos elementales que pueden llevar a una transferencia de energía en el detector así como los que no la producen.

$$R = 2,35\sqrt{\frac{Fw}{E}}. \quad (1.6)$$

Para los gases $F \leq 0,01$ mejorando su resolución, a diferencia de los centelladores donde $F \approx 1$, acercándose a la distribución de Poisson.

Además de las fluctuaciones en la ionización, el número de factores externos puede afectar la resolución global del detector, como el ruido que es un los efectos asociados a la electrónica [20, 22, 23].

1.1.2.4. Tiempo de respuesta.

Es el tiempo que transcurre entre el paso de una partícula y la formación de la señal y está determinado por el flanco de subida del pulso eléctrico. La duración de la señal también es importante, ya que durante este periodo, un segundo evento no puede ser detectado, ya sea debido a que el detector es insensible o porque la segunda señal se apila a la primera, esto contribuye al tiempo muerto y limita la tasa de conteo en el que se puede operar.

1.1.2.5. Eficiencia

Una característica muy importante de cada detector es su eficiencia, es decir, la probabilidad de que una partícula que pasa por el detector sea detectada. Se define la eficiencia total de un detector de partículas como el cociente entre el número de partículas detectadas y el número de partículas emitidas. Una eficiencia de 100 % implica que todas las radiaciones que llegan son detectadas. En cambio una eficiencia de 1 %, por ejemplo, significa que de cada 100 radiaciones que recibe, cuenta sólo una. Hay varias circunstancias que afectan la eficiencia de un detector, una de ellas es el tipo y la energía de la radiación. Las eficiencias relativas de un detector para alfas, betas, gammas o neutrones son muy diferentes, debido a los diferentes mecanismos de interacción de cada uno de ellos con materia (material del detector). La energía de las radiaciones incidentes es otro parámetro que afecta la eficiencia de un detector. Para empezar, la energía de partículas alfa o beta determina si éstas son capaces de cruzar el material que lo contiene y ser contadas. En el caso de rayos X o gamma, el poder de ionización depende del coeficiente de absorción para cada uno de los tres efectos (fotoeléctrico, Compton o pares). El acoplamiento eléctrico del detector al circuito, el nivel de discriminación para eliminar ruido electrónico, los valores y la precisión de los voltajes empleados, la magnitud de amplificación de los pulsos, la sensibilidad del indicador de carátula, la precisión de las escalas del indicador, son factores que afectan la eficiencia de conteo. Además, es importante señalar que la eficiencia debe referirse a la combinación detector-circuito-indicador, y no sólo a un dispositivo [23].

La eficiencia total o absoluta está definida como

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\text{Eventos registrados}}{\text{Eventos totales emitidos por la fuente}}, \quad (1.7)$$

que depende de la geometría del detector y la probabilidad de una interacción en el detector. También se puede definir como

$$\varepsilon_{tot} \simeq \varepsilon_{int} \cdot \varepsilon_{geo}. \quad (1.8)$$

La eficiencia intrínseca esta dada como

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{Eventos registrados}}{\text{Eventos que llegan al detector}}, \quad (1.9)$$

esta probabilidad depende de la sección eficaz de la radiación incidente, su energía y el material del detector y la eficiencia geométrica depende exclusivamente de la configuración del detector y la fuente [20, 22, 24]

1.1.3. Detectores de Ionización Gaseosos

Los detectores de ionización fueron unos de los primeros aparatos eléctricos desarrollados para la detección de radiación. Estos aparatos basan su funcionamiento en la recolección directa de la ionización al pasar por un gas. Han sido desarrollados tres tipos básicos de detectores, los cuales son: la cámara de ionización, el contador proporcional y el contador Geiger-Müller. Como las velocidades de movilización de electrones y iones son mucho mayores en un gas, este es el medio perfecto para la recolección de ionización de radiación.

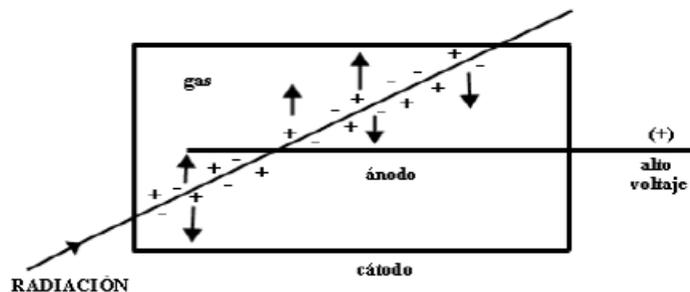


Figura 1.1: Funcionamiento de un detector de ionización gaseoso. Bajo la influencia del campo eléctrico los electrones y los iones positivos se desplazan hacia los electrodos [20].

Estos dispositivos de detección de radiación funcionan básicamente bajo un mismo principio. Consisten de un contenedor, que asumiremos como un cilindro, este está lleno de un gas,

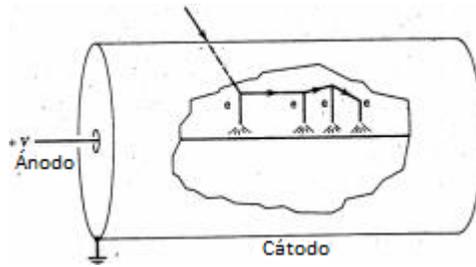


Figura 1.2: Modelo general de un detector de ionización gaseoso [18].

usualmente un gas noble como el argón (Ar) y a este cilindro se le aplica un voltaje V_0 . Todo esto forma un campo eléctrico radial, así:

$$E = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}. \quad (1.10)$$

De esta manera, si la radiación atraviesa el cilindro, se crearán un cierto número de pares ion-electrón, que será proporcional a la energía depositada en el contador. Bajo la acción del campo eléctrico los electrones serán acelerados hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo donde son recolectados. De esta manera, la señal observada depende de la intensidad del campo eléctrico [22, 24, 25, 26].

1.1.3.1. Curva Característica de respuesta

La señal de corriente observada, depende de la intensidad del campo, como se observa en la Figura 1.3, que representa la carga total colectada en función del voltaje V .

Al aumenta el voltaje de operación en un detector gaseoso se obtienen en diferentes regímenes de proporcionalidad:

I. El voltaje es tan bajo que la velocidad que adquieren los iones y electrones es pequeña, dando lugar a una alta probabilidad de que se recombinen. No proporciona mayor información, esta región normalmente no se usa.

II. Cámara de ionización: A bajo voltaje de operación se tiene una cámara de ionización que recoge la carga primaria producida en el volumen activo del detector. La Ganancia del detector es $G=1$.

III. Contador proporcional: Una vez se alcanza el voltaje crítico se produce multiplicación. La señal detectada es proporcional a la energía depositada. Esta región de la gráfica es denominada "avalancha de ionización". Este proceso de "avalancha" ocurre muy rápidamente se mide la señal de salida del contador la cual viene determinada por el tiempo de deriva de los electrones primarios, desde el momento de formación del ión original hasta el punto del ánodo

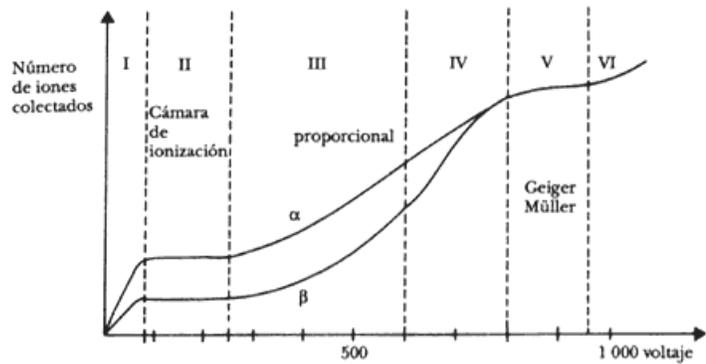


Figura 1.3: Número de electrones en la señal producida por una partícula de ionización mínima en un contador. Los diferentes regímenes de funcionamiento del contador en función del voltaje [21].

donde ocurre la “avalancha”. Los pulsos de rata de conteo del contador pueden llegar al orden de 10^6 rata de conteo por segundo por segundo. Para mantener la proporcionalidad se necesita controlar el desarrollo por fotoionización de la avalancha. Se utiliza un gas orgánico que absorbe los fotones ultravioleta (el moderador o quencher). Las mezclas usuales son un gas noble con un gas orgánico (i.e. Ar+10 % CH₄) . $G = 10^4 - 10^6$.

Este tipo de dispositivos son usados para hacer tratamientos médicos donde la radiación no sea un efecto secundario que afecte a los pacientes. Se usan en escáneres para realización de tomografías [27].

IV. Región de proporcionalidad limitada: se alcanza una gran fotoionización. Para evitar descargas se puede usar HV pulsado. $G = 10^9$.

V. Modo Geiger-Müller: la avalancha se extiende a todo el ánodo. Fotoionización masiva. En esta región la ionización secundaria y la multiplicación son tan intensas que se logra una verdadera avalancha de cargas en cada pulso. Los pulsos son grandes por la gran cantidad de iones colectados, pero se pierde la dependencia en la ionización primaria. Los detectores Geiger-Müller (o sencillamente contadores Geiger) que operan en esta región son indicadores de la presencia de radiación, pero no pueden medir su energía. Son los más usados porque son fáciles de operar, soportan trabajo pesado, son de construcción sencilla y se pueden incorporar a un monitor portátil. Generalmente operan con voltaje de alrededor de 700 a 800 Volts, pero esto puede variar según el diseño de cada detector.

VI. Si se incrementa el voltaje aún más, se obtiene una descarga continua, no útil para conteo [19, 25, 26].

1.1.3.2. Fenómenos de ionización

Cuando una partícula cargada viaja a través de un medio gaseoso, la interacción de Coulomb entre la partícula y los átomos del gas provocará la excitación o ionización de las moléculas de gas. Si la molécula del gas es ionizada, un electrón libre y un ión positivo son producidos.

La energía de ionización para la mayoría de los gases está entre 10 y 20 eV, pero el promedio de energía necesaria para producir un par electrón-ion es dos veces más grande. Esto se debe a que la energía transferida al electrón es generalmente más grande que lo que se necesita para ionizar el átomo, y parte de esta energía cinética se disipa como calor. Si este electrón ha adquirido la suficiente energía, va a causar más ionización de las moléculas del gas. Cada electrón primario típicamente da lugar a tres pares electrón-ión. Si una partícula cargada viaja una distancia fija de un gas, la cantidad de energía depositada varía de un caso a otro. Esto es en parte debido a la fluctuación en el número de electrones primarios expulsado de las moléculas de gas y en parte debido a la fluctuación de la cantidad de energía recibida por cada electrón. Esto dará lugar a una distribución del número de cargas más amplio que lo que se puede esperar de una distribución de Poisson [18, 25, 28]

En un detector gaseoso puede usarse cualquier gas (incluso aire), normalmente se usa la mezcla de un gas inerte (Argón) con un gas orgánico, primero se ioniza fácilmente y el segundo cede fácilmente electrones para recuperar las condiciones iniciales después de la descarga. Cada gas tiene diferente potencial de ionización, que hace referencia a la energía necesaria para producir una ionización. En el Tabla 1.1 se indican los potenciales de ionización y de excitación para diferentes gases y la energía media para la creación de un par ion-electrón [9, 25].

Gas	P. Excitación (eV)	P. Ionización (eV)	Energía Media Ión-Electrón (eV)
H ₂	10.8	15.4	37
He	19.8	24.6	41
N ₂	8.1	15.5	35
O ₂	7.9	12.2	31
Ne	16.6	21.6	36
Ar	11.6	15.8	26
Kr	10.0	14.0	24
Xe	8.4	12.1	22
CO ₂	10.0	13.7	33
CH ₄		13.1	28
C ₄ H ₁₀		10.8	23

Tabla 1.1: Características de ionización y excitación para varios gases [19].

1.1.3.3. Transporte de iones y electrones en gases

El movimiento de iones y electrones dentro del detector es descrito por la teoría cinética de gases a través de los fenómenos de difusión y deriva en un campo eléctrico.

- Difusión: En ausencia del campo eléctrico, los iones y electrones liberados por el paso de la radiación se difunden uniformemente alejándose de su punto de creación. En este proceso ellos experimentan múltiples colisiones con las moléculas del gas y van perdiendo su energía y quedan rápidamente en equilibrio térmico con las moléculas de gas que finalmente se recombinan. A energías térmicas, las velocidades de las cargas con descritas por la distribución de Maxwell, en la cual la velocidad media está definida como:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (1.11)$$

donde k es la constante de Boltzman, T la temperatura y m la masa de la partícula. La velocidad promedio sea mucho más grande en los electrones que en los iones debido a su masa. A temperatura ambiente, la velocidad del electrón es del orden de 10^6 cm/s , mientras que la velocidad de los iones positivos son del orden de 10^4 cm/s . De la teoría cinética, la distribución lineal de las cargas después de la difusión de un tiempo t puede ser mostrada por una gaussiana

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (1.12)$$

donde N_0 es el número total de cargas, x es la distancia desde el punto de creación y D es coeficiente de difusión. La desviación estándar para x :

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt}.$$

Si se considera en el espacio,

$$\sigma(r) = \sqrt{6Dt}.$$

Donde r es la distancia radial. El coeficiente de difusión es un parámetro que puede ser calculado de la teoría cinética

$$D = \frac{1}{3}v\lambda. \quad (1.13)$$

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

λ es el camino libre medio de los electrones o iones del gas. Para un gas ideal el camino libre medio se relaciona con la temperatura T y la presión p , como

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 p},$$

donde σ_0 , es la sección eficaz total para una colisión con una molécula de gas. De manera, que la expresión para el coeficiente de difusión es

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{p\sigma_0} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}}. \quad (1.14)$$

Se puede observar que D depende de varios parámetros del gas [19, 21].

- Deriva y movilidad: En presencia de un campo eléctrico, los iones y electrones liberados por la radiación son acelerados a lo largo de las líneas de campo hacia el ánodo y cátodo. Esta aceleración disminuye por las colisiones con las moléculas de gas que limitan la velocidad media máxima que puede alcanzarse hacia la dirección del campo, de manera que la velocidad media alcanzada es conocida como la velocidad de deriva de la carga.

La movilidad de una carga es definida como:

$$\mu = \frac{u}{E}, \quad (1.15)$$

donde u es la velocidad de deriva y E , la intensidad del campo eléctrico. Para los iones positivos la velocidad de deriva depende linealmente de la relación E/p , entonces para una presión constante la movilidad μ es constante. Para gases ideales la movilidad se puede relacionar con el coeficiente de difusión (ver Tabla 1.2 y la Figura 1.4), de la forma [18, 19]:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}. \quad (1.16)$$

Gas	Ion	Movilidad [$cm^2V^{-1}s^{-1}$]
Ar	Ar ⁺	1.54
He	He ⁺	10.4
CO ₂	CO ₂ ⁺	1.09
Ar	CH ₄ ⁺	1.87
Ar	C ₄ H ₆ ⁺	2.06
Ar	iC ₄ H ₁₀ ⁺	2.15
Ar	CO ₂ ⁺	1.72

Tabla 1.2: Movilidad de iones para algunos gases [18].

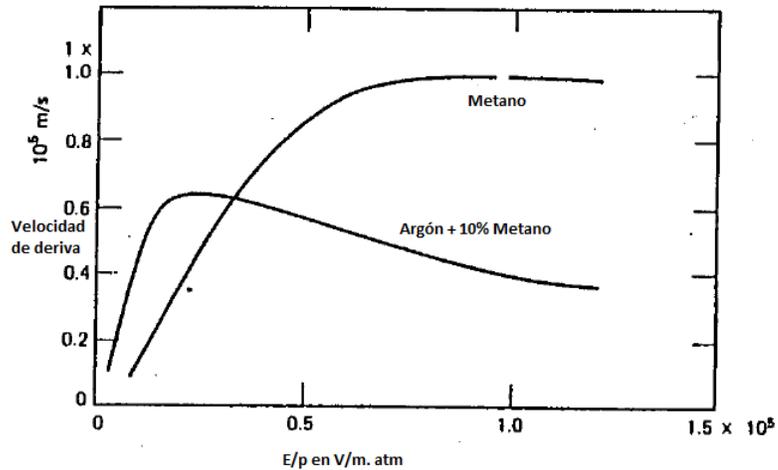


Figura 1.4: Velocidad de deriva de un electrón en función del campo eléctrico E dividido por la presión del gas p [19].

1.1.4. Multiplicación de avalancha

Debido a que los electrones se mueven más rápido, la avalancha tiene la forma de ápice de una gota líquida donde los electrones están agrupados cerca de la cabeza y los iones que se mueven más lentos arrastrándose detrás, como se muestra en la Figura 1.5

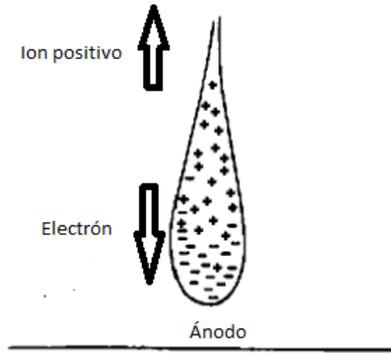


Figura 1.5: Formación de avalancha. Los electrones se mueven más rápido que los iones positivos, de manera que la avalancha tiene la forma de gota [19].

Si α es la trayectoria libre media de los electrones para una colisión de ionización secundaria, entonces $1/\alpha$ es la probabilidad de una ionización por unidad de trayectoria y esto se conoce como el primer coeficiente de Townsend. Si hay n electrones, entonces en un trayectoria dx ,

$$dn = n\alpha dx, \quad (1.17)$$

nuevos electrones producidos. Integrando, da el número total de electrones creados en una trayectoria dx .

$$n = n_0 e^{\alpha x}, \quad (1.18)$$

donde n_0 es el número inicial de electrones. Entonces el factor de multiplicación es

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x}. \quad (1.19)$$

Para el caso en el cual el campo eléctrico no es uniforme, el factor de multiplicación es

$$M = e^{\int \alpha(x) dx}. \quad (1.20)$$

Este factor tiene un límite de $M < 10^8$ o $\alpha x = 20$, después de que la descarga ocurre. Esto se conoce como límite de Raether. El factor de multiplicación o ganancia del gas es de fundamental importancia para el desarrollo de contadores proporcionales. Por esta razón, varios modelos teóricos fueron desarrollados para calcular α para diferentes gases [19, 22].

El contador proporcional simple se utiliza generalmente para la detección de rayos X de baja energía, del orden de unos pocos keV y electrones de baja energía. La característica principal de los contadores proporcionales es la multiplicación proporcional que se produce en el gas y para ello es necesario que se considere la forma del campo eléctrico, por ejemplo un detector de placas paralelas separadas por un gap de gas, el campo eléctrico es uniforme y perpendicular a las placas.

Si se aplica un voltaje lo suficientemente alto a los electrodos, los electrones creados en un evento ionizante serán acelerados hacia la placa de ánodo provocando avalanchas a lo largo de su trayectoria. [28].

1.1.5. Gas de llenado

La elección de un gas de relleno para contadores proporcionales se rige por varios factores: Voltaje de funcionamiento bajo, alta ganancia, buena proporcionalidad y capacidad de alta velocidad de los electrones. En general, estas condiciones se cumplen para las mezclas de gases. Para una tensión mínima de trabajo, los gases nobles suelen ser elegidos ya que requieren de intensidades de campo eléctrico más bajas para la formación de avalanchas. El Argón es usualmente utilizado debido a que es altamente ionizable y su costo es bajo. El argón puro como gas de llenado, no puede ser operado con ganancias de más 10^3 a 10^4 sin que ocurran descargas continuas. Esto surge debido a su baja energía de excitación (11.6 eV) para este elemento. Átomos de argón excitados formados en la avalancha se desexcitan dando lugar a fotones de alta energía capaz de ionizar el cátodo y causan más avalanchas.

Este problema se puede remediar si se mezcla con un gas poliatómico, tal como metano o alcohol. Unos gases inorgánicos, tales como CO_2 , BF_3 también se puede utilizar. Estas moléculas actúan como desactivadores mediante la absorción de los fotones radiados y luego disipan esta energía a través de disociación o colisiones elásticas. Una pequeña cantidad de gas poliatómico ya produce cambios dramáticos en el funcionamiento del contador. De hecho, se obtienen ganancias de hasta 10^6 . En contadores proporcionales convencionales la mezcla que comúnmente se utiliza es 90 % de Ar y 10 % de metano (CH_4). Esta mezcla también se conoce como gas P10 [18, 19].

1.1.6. Detector Resistive Plate Chamber “RPC”

Los detectores gaseosos denominados “The Resistive Plate Chamber” (RPC) fueron desarrollados en 1981 por R. Santonico y R. Cardarelli [7, 8] y están basados esencialmente en el mismo principio que el Planar Spark Chamber de Pestov, con algunas modificaciones como: la ausencia de gas a altas presiones, menores requerimientos de precisión mecánica y el uso de materiales de plástico en lugar de vidrio. Este detector no sufre daños por las descargas

y proporciona una resolución temporal del orden de 1 ns; ventajas que hicieron al RPC de interés potencial para las aplicaciones en experimentos modernos.

Un RPC es un detector de partículas que utiliza un campo eléctrico constante y uniforme, producido por dos los electrodos de placas paralelas, hechas de resina fenólica (baquelita) con una resistencia mayor a $10^{11}\Omega cm$. La mezcla de gas utilizada se caracteriza por un alto coeficiente de absorción de luz ultravioleta que se genera entre los electrodos. Cuando el gas es ionizado por el paso de una partícula cargada, los portadores de carga libres producen avalanchas de electrones en el campo eléctrico aplicado y se origina una descarga. Debido a la alta resistividad de los electrodos, el campo eléctrico de repente es nulo en un área limitada en el punto donde se produjo la descarga, por lo tanto, se evita que la descarga se propague a través de todo el volumen de gas. La sensibilidad del RPC no se ve afectada, fuera de esta pequeña área. Por otro lado, debido a la componente de absorción de ultravioleta de la mezcla de gas, los fotones producidos por la descarga no se pueden propagar en el gas, evitando que se originen descargas secundarias en otros puntos del detector. La propagación de un gran número de electrones induce una corriente en los electrodos [29, 30].

Los RPC presentan mejor tiempo de resolución que las cámaras de alambres. Esta es una ventaja que se presenta porque el campo es uniforme en comparación con el campo de las cámaras de alambres que depende de $1/r$, donde r es la distancia al alambre, que produce grandes fluctuaciones debido al movimiento de deriva de los electrones. Recientemente se están construyendo versiones más sofisticadas del RPC, en las cuales, se utilizan electrodos extremadamente planos de vidrio semiconductor y gas de alta presión. Estos detectores proporcionan mejores resoluciones temporales incluso que las alcanzadas por centelladores y fotomultiplicadores rápidos.[2, 31].

1.1.6.1. Principio básico de operación

El objetivo de un sistema de detección es identificar y medir las cantidades de movimiento y / o energías de diferentes partículas, que dejan su rastro en los detectores. El proceso físico sobre el que se basa cualquier detector de ionización de gas es: el paso de una partícula cargada a través de un volumen de gas da lugar a la producción de pares de ion-electrón. La velocidad de deriva de los electrones es mucho más alta en comparación con la de los iones y si un campo eléctrico suficientemente intenso como se aplica en todo el volumen de gas, los electrones primarios producen nuevas ionizaciones. Este mecanismo de multiplicación resulta en una distribución de carga libre en el gas que tiene forma característica de avalancha y los procesos de recombinación suelen presentarse durante el desarrollo de está donde se producen fotones que pueden a su vez iniciar el desarrollo de avalanchas secundarias. Estas se producen principalmente a lo largo del eje de la avalancha primaria. El régimen en el que se producen varias avalanchas secundarias causando grandes cantidades de carga libre en el gas se llama régimen streamer. Además, si el plasma ion-electrón conecta los dos electrodos, se crea la llamada chispa y la propagación del creciente número de cargas induce una señal

de salida en el electrodo.

La configuración más simple de un RPC se presenta en la Figura 1.6. Los dos electrodos planos hechos de un material resistivo (normalmente de vidrio o de baquelita) están separados por unos pocos mm y están conectados a una fuente de alimentación de alta tensión con el fin de crear un campo eléctrico (alrededor de 5 kV/mm) uniforme e intenso entre ellos. Una capa fina de grafito recubre la superficie externa de los electrodos para permitir la aplicación uniforme del alto voltaje, los electrodos se mantienen separados por medio de pequeños espaciadores de policarbonato y alta resistividad ($10^{13}\Omega - cm$).

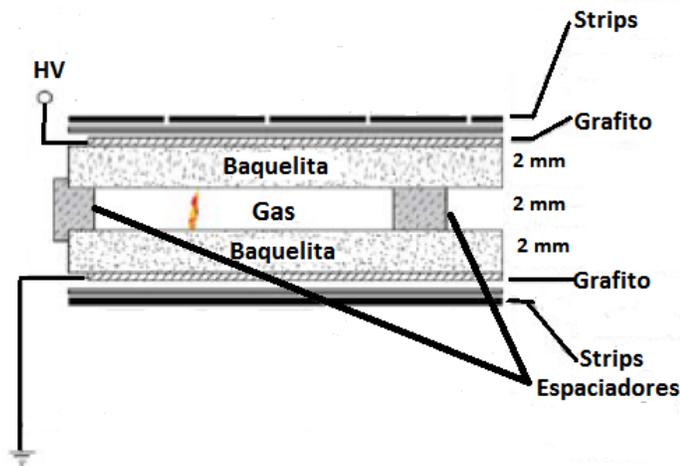


Figura 1.6: Esquema de un RPC simple [29]. Los electrodos planos son hechos de un material resistivo (normalmente de vidrio o de baquelita) y están conectados a una fuente de alimentación de alta tensión. Una capa fina de grafito recubre la superficie externa de los electrodos, que se mantienen separados por medio de pequeños espaciadores de alta resistividad.

Una mezcla de gases puede consistir en argón, isobutano y un gas electronegativo como el freón donde el argón actúa como blanco para las partículas ionizantes mientras el isobutano, siendo un gas orgánico, ayuda a absorber los fotones que resultan de procesos de recombinación limitando la formación de avalanchas secundarias y el gas electronegativo se utiliza para limitar la cantidad de carga libre en el gas. Este tipo de mezcla de gas es particularmente importante cuando se desea evitar la aparición de modo streamer. La resistividad superficial de la capa de grafito es lo suficientemente alta para que sea transparente a los pulsos eléctricos generados por el desplazamiento de carga en el gap de gas. Por esta razón, las señales eléctricas pueden ser inducidas en los strips (bandas metálicas) y se localizan en la superficie externa del gap; dos conjuntos diferentes de strips están orientados en direcciones ortogonales pueden estar ubicados en ambos lados del detector para obtener mediciones en ambos planos. Los strips se comportan como líneas de transmisión con impedancia característica típica de aproximadamente 50Ω [29, 31, 32].

1.1.6.2. Modos de operación

Los RPC pueden ser operados en el modo de avalancha (también llamado modo proporcional limitado) o en el modo streamer. En el modo de avalancha, la liberación de la carga primaria por la radiación ionizante incidente genera la propagación y multiplicación de los electrones correspondiente a una avalancha de Townsend [33]. Para una ganancia grande en el gas se produce un cambio en la dinámica de la avalancha. A continuación, los portadores de carga influyen en el campo eléctrico producido en el gap de gas y por lo tanto a su propia propagación y multiplicación. Esto se conoce como el efecto de carga de espacio. Cuando la ganancia de gas se incrementa aún más, los fotones empiezan a contribuir a la propagación de la avalancha y aparece el modo streamer. En una etapa posterior, se forma un canal conductor entre los dos electrodos, a través del cual se descargan las superficies de los electrodos y se puede producir una chispa débil. La formación de la señal eléctrica en el RPC se basa esencialmente en el proceso de la multiplicación de electrones.

Los regímenes de funcionamiento del RPC - avalancha o streamer, se pueden distinguir por el valor de M (ver ecuación 1.19). Si M es mayor que 10^8 , entonces las ionizaciones primarias darán lugar a modo streamer con alta probabilidad. Por el contrario, para los valores de M mucho menores que 10^8 son suficientes para evitar la formación de avalanchas secundarias y se presenta un simple fenómeno de multiplicación de carga. En este caso, el detector funciona en modo de avalancha. La transición al régimen de streamer por un RPC diseñado para operar en el modo de avalancha es a menudo un problema grave de tratar.

Como lo sugerido por Y.N. Pestov, un detector plano con electrodos resistivos se puede modelar como un conjunto de celdas de descarga de primer orden que pueden ser considerados como independientes una del otro. La expresión de la capacitancia de un condensador plano conduce al resultado de que el área de dichas celdas es proporcional a la carga Q promedio total que se produce en el gap de gas [34]:

$$S = \frac{Qd}{\epsilon_0 V}, \quad (1.21)$$

donde, d es el ancho del gap y V es el voltaje aplicado entre los electrodos. Esta expresión explica la importancia el parámetro Q en la tasa de detección máxima que un RPC es capaz de sostener de manera eficiente: cuanto menor es el valor de Q , menor es la superficie de las celdas de descarga y por lo tanto es mayor su capacidad. La carga media producida en el gap para un RPC que opera en el modo streamer es ~ 100 pC, mientras que en el modo de avalancha el valor es de aproximadamente 1pC.

1. **Modo avalancha del RPC:** Las imágenes esquemáticas de la elaboración de una avalancha en un RPC y las deformaciones de campo eléctrico causado por las cargas de la avalancha se muestran en la Figura 1.7. E_0 es el campo eléctrico uniforme

aplicado entre los electrodos [35]. Algunos átomos del gas son ionizados por el paso de una partícula cargada entre el gap. Posteriormente se inicia una avalancha y su tamaño es suficientemente grande para influenciar el campo eléctrico. Los electrones alcanzan la placa del ánodo y los iones se desplazan más lentamente debido a que sus velocidades de deriva son sustancialmente menores. Finalmente los iones alcanzan el cátodo y las cargas de las capas resistivas influyen en el campo en una pequeña área alrededor de la posición donde la avalancha se desarrolla [36].

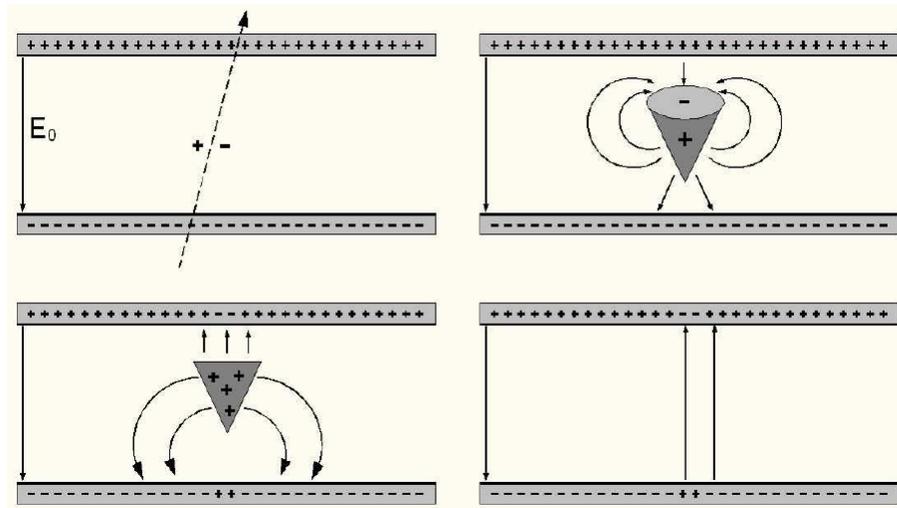


Figura 1.7: Imágenes esquemáticas del desarrollo de la avalancha en un RPC [37]. Algunos átomos del gas son ionizados por el paso de una partícula cargada entre el gap. Se inicia una avalancha influenciando el campo eléctrico, los electrones alcanzan la placa del ánodo y los iones alcanzan el cátodo.

2. **Modo streamer del RPC:** Como las señales streamer son bastante grandes (entre 50 pC y algunos nC), no es necesario amplificarlas y se pueden discriminar con el umbral de detección directa. Así, la lectura del modo streamer de RPC es bastante simple. En este modo de operación las cámaras de doble gap funcionan con campos eléctricos de 40 kV/cm y anchos de gaps de 2 mm alcanzando eficiencias del 99% y una resolución temporal de alrededor de 1 ns . Las imágenes esquemáticas que representan diversas etapas de desarrollo del modo streamer en un RPC se muestran en la Figura 1.8. Inicia con el desarrollo de una avalancha. Las cargas de avalancha distorsionan el campo eléctrico dentro del gap de gas, por otra parte, los fotones de mayor energía comienzan a contribuir con el desarrollo de avalancha y causan una rápida propagación de ella. Puede crearse una chispa débil en esta etapa y el electrodo se descarga en un área localizada debido a la alta resistividad del material. El campo eléctrico disminuye rápidamente alrededor del punto donde se forma avalancha y en el detector se desarrolla un punto ciego.

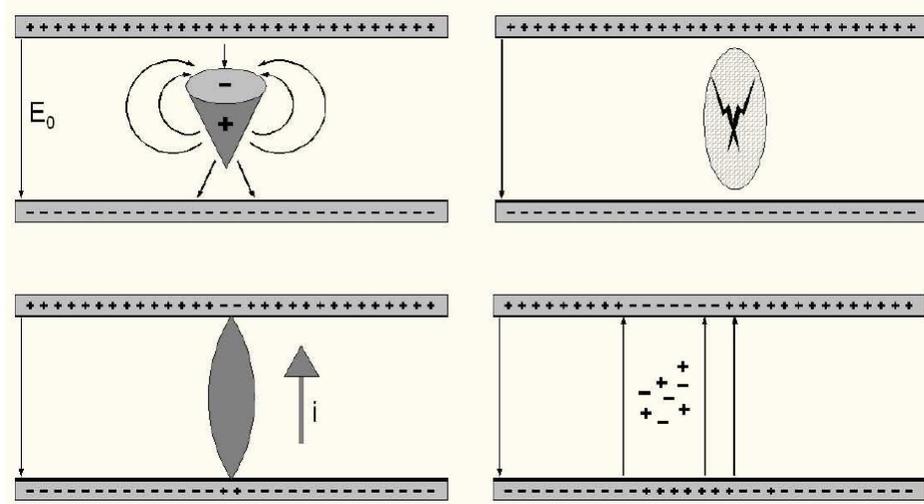


Figura 1.8: Imágenes esquemáticas del desarrollo del modo streamer en un RPC [37]. Se inicia con el desarrollo de una avalancha, donde las cargas de avalancha distorsionan de campo eléctrico y los fotones de mayor energía comienzan a contribuir con el desarrollo de avalancha y causan una rápida propagación de ella. Puede crearse una chispa débil en esta etapa.

1.1.6.3. Clasificación de los RPC

Los RPC se clasifican como disparadores o temporizadores dependiendo de su aplicación en el experimento. La distinción es en gran medida subjetiva, se espera que los RPC temporizadores proporcionen mejor resolución temporal en comparación con los RPC de disparo y por lo tanto los primeros se utilizan como detectores de Tiempo de vuelo (Time-Of-Flight ,TOF) en muchos experimentos. Los RPC de disparo se utilizan típicamente para detectar el paso de partículas de mínima ionización (MIPS), tales como muones .

1. **RPC de disparo (trigger):** Gran parte de los RPC con gaps sencillos o dobles con ancho de 2 mm son operados en el modo avalancha y proporcionan eficiencias del 98% para un flujo de partículas de varios kHz/cm^2 . Normalmente este tipo de RPC se utilizan como RPC de diparo. Por ejemplo, en un acelerador, se utilizan con el fin de identificar de un grupo de haces cuál de ellos pertenece al muón y al hacer coincidencia se limita la radiación de fondo, para ello se necesita una resolución temporal de alrededor de 1 ns. Esto se logra fácilmente mediante la implementación de RPC como detectores de disparo.
2. **RPC temporizadores (Timing):** En el área de los RPC temporizadores se utilizan gaps de gas de 0.2 a 0.3 mm, son ampliamente utilizados en las configuraciones de multi-gap y proporcionan una eficiencia del 99%, con resolución temporal hasta de

50 ps. Este RPC funciona en el modo de avalancha con un campo eléctrico de 100 kV/cm, es comparable a la tecnología de centelleo basada en TOF[38].

1.1.6.4. Diseños del RPC

Diferentes tipos de adaptaciones y materiales utilizados en los RPC los dotan de una gran variedad de configuraciones que se describe en los diseños expuestos a continuación [38]:

1. **RPC de gap Simple:** El diseño original del RPC, incluye un gap de gas delimitado por los electrodos resistivos de baquelita, sin embargo, se ha mejorado su diseño desde entonces; implementado electrodos de vidrio, que se caracterizan por su rigidez mecánica y una mejor calidad de superficie. El potencial eléctrico en los electrodos se aplica a través de una capa semi-resistiva que es transparente a las señales inducidas. La ventaja inherente de este diseño es la ausencia de condensadores de alta tensión evitando la necesidad de aislamiento a alto voltaje de los strips. La mayoría de los RPC se construyen con gap de 2 mm y alcanzan una resolución temporal de 1 a 1.5 ns, independientemente del modo de funcionamiento. Estos resultados se obtienen normalmente mediante el uso de una técnica simple de discriminación [39]. En la mayoría de las aplicaciones del detector no se requiere la determinación de la posición de las partículas cargadas, pero generalmente se hace el esfuerzo para optimizar el hardware que capta señales para obtener la mejor resolución de la posición de un detector de RPC.
2. **RPC de Doble gap:** La estructura de doble gap se introdujo para mejorar la eficiencia de detección con el modo de operación de avalancha, extendiendo sus capacidades de tasa de conteo. El dibujo esquemático de este RPC se muestra en la Figura 1.9. Las avalanchas producidas en uno o ambos gaps inducen señales en los strips mas cercanos a la avalancha [40].

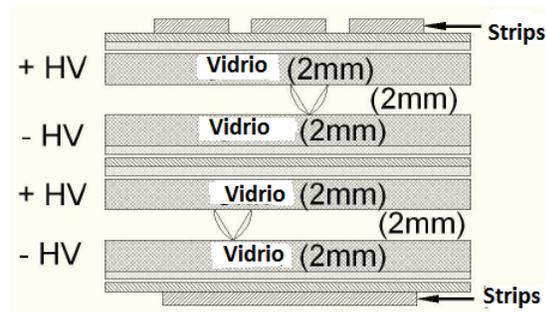


Figura 1.9: Esquema de un RPC con doble gap [36].

3. **RPC Multigap:** La característica más destacada de este diseño es que el volumen entre los electrodos se divide en varios gaps con placas resistivas flotantes que son

transparentes a las señales producidas por las avalanchas; de manera, que las señales inducidas en el ánodo y el cátodo son la suma analógica de avalanchas en todas los gaps. Las avalanchas en los diferentes gaps tienen el mismo tiempo de desarrollo. Una de las desventajas de este diseño es que son necesarios voltajes muy grandes. El dibujo esquemático se muestra en la Figura 1.10.

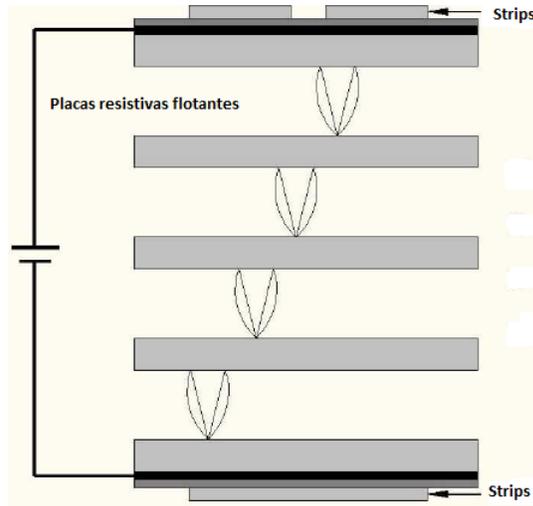


Figura 1.10: Esquema del RPC multigap [37]

La eficiencia de un RPC multigap se puede comparar con la de un RPC de un solo gap, a través de la expresión [38]:

$$\varepsilon_{1gap} = 1 - \bar{\varepsilon}_{1gap} \approx 1 - \sqrt[n]{1 - \bar{\varepsilon}_{ngap}}, \quad (1.22)$$

donde n es el número de gaps, ε_{1gap} es la eficiencia por gap, $\bar{\varepsilon}_{1gap}$ es la ineficiencia por gap y finalmente $\bar{\varepsilon}_{ngap}$ la ineficiencia del Rpc de multigap.

4. **RPC Híbrido:** Se pueden combinar electrodos resistivos y metálicos, su único requisito es que el gap de gas esté delimitado por dos electrodos metálicos. Actualmente, los contadores de gas formados por dos electrodos metálicos se conocen como cámara de placas paralelas (PPC) y se han encontrado amplias aplicaciones en la detección de iones pesados, donde se utilizaron electrodos de malla de alambre [25]. Sin embargo, debido a la naturaleza violenta de las descargas, este tipo de contador nunca encontró una amplia aceptación en aplicaciones de física de altas energías. Un ejemplo esquemático de un RPC híbrido se muestra en la Figura 1.11.

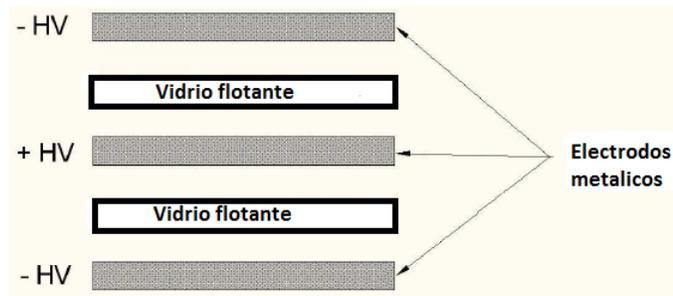


Figura 1.11: Esquema de un RPC Híbrido [38]

5. **Micro RPC:** Un dibujo esquemático de un Micro RPC con un gap de $100 \mu m$, equipado con un sólido convertidor de rayos X y strips separados a $30 \mu m$ se muestra en la Figura 1.12. Resultados obtenidos con radiación de un haz de rayos X colimado por un rendija de $30 \mu m$ de separación, mostró que la mayoría de señal fue recogida en un solo strip, dando una resolución FWHM aproximadamente de $30 \mu m$ en el modo de conteo digital. Las razones de este resultado son la buena localización de la carga primaria por el convertidor sólido y el hecho de que la mayor parte de la carga en la avalancha se desarrolla muy cerca del ánodo. Debido a su crecimiento exponencial, la avalancha produce un perfil de carga inducida muy estrecho.

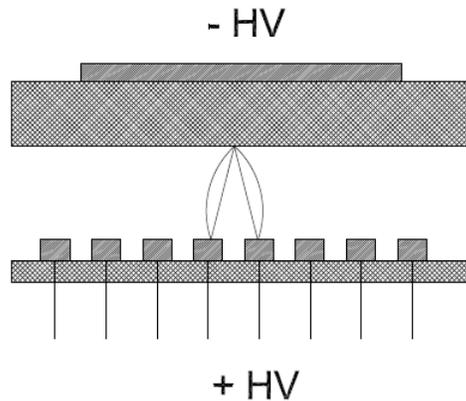


Figura 1.12: Esquema simplificado de un Micro Rpc [41].

6. **RPC Especiales:** Los detectores de alta tasa de conteo se puede construir mediante la combinación de estructuras metálicas de los contadores clásicos como PPC o PPAC con ánodos de baja resistividad ($\rho = 4 \times 10^4 \Omega cm$). Los diseños resultantes producen detectores estables y de descarga libre.

1.1.6.5. Aplicaciones

Grandes sistemas basados en los detectores RPC han sido empleados en varios experimentos importantes en el pasado. La existencia de los múltiples diseños de RPC, que emplean una variedad de materiales, técnicas de construcción y modos de funcionamiento, amplía su uso en los experimentos y son prototipos para experimentos futuros. En virtud de su flexibilidad en el diseño y la construcción, los RPC son adaptables a una variedad de aplicaciones y entornos. Por lo tanto son preferidos sobre las otras tecnologías para los aceleradores, así como para experimentos de rayos cósmicos, entre otros. Un breve resumen de implementación de RPC en los experimentos pasados y actuales se da en el Tabla 1.3.

Experimento	Aplicación	Área(m^2)	Electrodos	Gap(mm)	Gaps	Modo
Babar	Disparo	2000	Baquelita	2	1	Streamer
Belle	Disparo	2200	Vidrio	2	2	Streamer
ALICE-Muón	Disparo	140	Baquelita	2	1	Streamer
ATLAS	Disparo	6550	Baquelita	2	1	Avalancha
CMS	Disparo	2953	Baquelita	2	2	Avalancha
STAR	Temporizador	50	Vidrio	0.22	6	Avalancha
ALICE-TOF	Temporizador	150	Vidrio	0.25	10	Avalancha
OPERA	Disparo	3200	Baquelita	2	1	Streamer
YBJ-ARGO	Disparo	5630	Baquelita	2	1	Streamer
BESIII	Disparo	1200	Baquelita	2	2	Streamer
HARP	Temporizador	10	Vidrio	0.3	4	Avalancha
COVER-PLASTEX	Temporizador	10	Baquelita	2	1	Streamer
EAS-TOP	Temporizador	40	Baquelita	2	1	Streamer
L3	Disparador	300	Baquelita	2	2	Streamer
HADES	Temporizador	8	Vidrio	0.3	4	Avalancha
FOPI	Temporizador	6	Vidrio	0.3	4	Avalancha
PHENIX	Disparador		Baquelita	2	2	Avalancha
CBM TOF	Temporizador	120	Vidrio	0.25	10	Avalancha
NeuLAND	Temporizador	4	Vidrio	0.6	8	Avalancha

Tabla 1.3: Resumen de las aplicaciones del RPC en los experimentos pasados y actuales [29]

1.2. Muones Cósmicos

La tierra está constantemente bombardeada con partículas de alta energía (principalmente protones) que vienen del espacio exterior. La fuente de estas partículas aún sigue siendo un misterio; en todo caso, cuando golpean los átomos en la atmósfera superior producen

una lluvia de partículas secundarias, principalmente muones, que alcanzan a llegar a la tierra. Como fuente de las partículas elementales, los rayos cósmicos tienen dos virtudes: son gratis y su energía puede ser enorme, mucho mayor de la que podríamos producir en el laboratorio [49]. Pero tienen dos inconvenientes importantes: la velocidad a la que golpean cualquier detector es muy baja, y son completamente incontrolables. El muón fue descubierto en 1937 por J. C. Street y E. C. Stevenson en una cámara de niebla y fue publicado en "New Evidence for the Existence of a Particle Intermediate Between the Proton and Electron", Phys. Rev. 52, 1003 (1937). Antes de este momento, se suponía que las partículas fundamentales eran los electrones, los protones y los entonces recién descubiertos neutrones. El descubrimiento atrajo la atención sobre la predicción de Hideki Yukawa en 1935, de que un "mesón" de masa intermedia, podría ser el responsable de la fuerza fuerte nuclear. Yukawa había predicho una masa de alrededor de $100MeV/c^2$, y el muón tenía una masa muy cerca de esa $m_{\mu}=207m_{e-} = 105.7MeV/c^2$. Pronto se descubrió, sin embargo, que el muón no participaba en la interacción fuerte. Hans Bethe y Robert Marshak sugirieron que el muón podría ser el producto de la desintegración de la partícula necesaria en la teoría de Yukawa, de modo que la búsqueda continuó. Esa búsqueda llevó al descubrimiento del pión.

El muón es un leptón que decae para formar un electrón $\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$ o un positrón $\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \bar{\nu}_{\mu} + \nu_e$ y son las partículas energéticas más abundantes a nivel del mar (ver fig. 1.13). Los muones, son partículas que interactúan con la materia ionizándola. La pérdida de energía de los muones que pasan a través de la atmósfera, es proporcional a la cantidad de materia que atraviesan. El medio se caracteriza generalmente por su densidad (g/cm^3), multiplicada por la distancia recorrida en centímetros. Esto a veces se llama "longitud de interacción" y se mide en g/cm^2 . La pérdida de energía de los muones es de aproximadamente 2 MeV por g/cm^2 . La mayoría de los muones se crean a una altura de unos 15 km, y viajan con otras partículas a la Tierra en lluvias cónicas, dentro de aproximadamente 1° de la trayectoria de la partícula primaria que las crea. La profundidad de la interacción con la atmósfera, es de unos $1000 g/cm^2$, por lo que los muones pierden alrededor de 2 GeV al pasar por la atmósfera. La energía media de muones en la superficie del mar es ≈ 4 GeV, sugiriendo una energía original de los muones aproximadamente de 6 GeV.

La intensidad de muones por encima de 1 GeV/c sobre el nivel del mar es de $\approx 70m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$. En mediciones recientes los experimentales están familiarizados con el número $I \approx 1 cm^{-2} min^{-1}$ para los detectores horizontales [50].

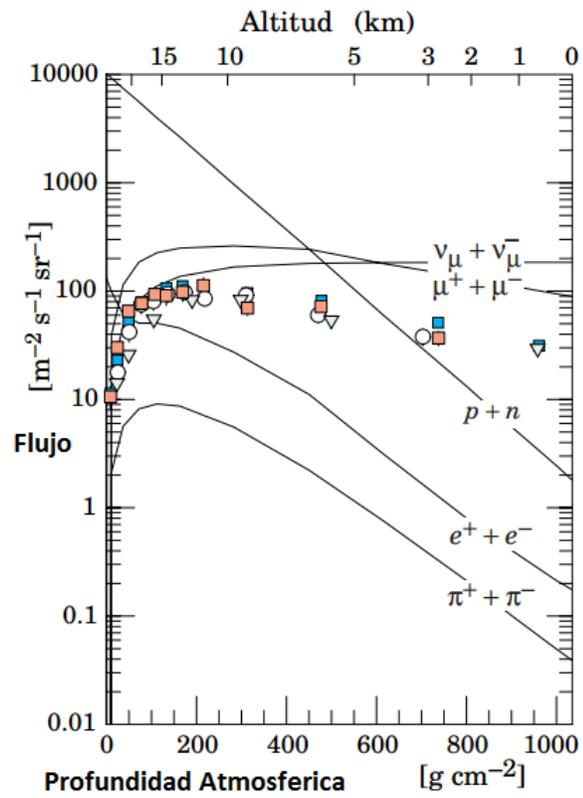


Figura 1.13: Flujos verticales de los rayos cósmicos en la atmósfera. Los puntos muestran mediciones de muones negativos con energía menor a 1 GeV [50].

Capítulo 2

EXPERIMENTO

En este capítulo, se describe el diseño y desarrollo del RPC, junto con los resultados de la caracterización. El detector construido tiene un tamaño de $21.0\text{cm} \times 21.0\text{cm} \times 6.0\text{cm}$ y se caracterizó con muones cósmicos utilizando diferentes tipos de gases Aire, Argón (*Ar*), Metano (*CH₄*) y la mezcla *P10* (90% *Ar*+10% *CH₄*). En las secciones a continuación se describe el proceso de construcción y los primeros resultados.

2.1. Diseño y Construcción

Se realizó la revisión bibliográfica para determinar las dimensiones geométricas y el tipo de materiales, teniendo en cuenta las propiedades adecuadas para su funcionamiento y la facilidad de disponibilidad en el mercado. En la Figura 2.1 se muestra el diseño del detector.

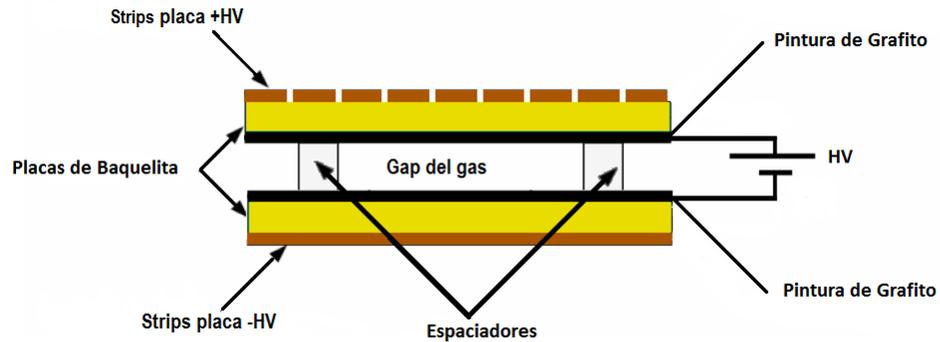


Figura 2.1: Diseño del RPC. El detector consta de dos electrodos de baquelita, separados por espaciadores de plástico. La superficie externa de cada placa se encuentra los strip, que recogen la señal del detector y en la superficie interna, se aplica pintura de grafito que permite la aplicación uniforme del alto voltaje. Las placas de strips están orientadas en direcciones ortogonales para obtener mediciones en ambos planos.

2.1.1. Caja de acrílico

El circuito eléctrico del detector se ubica dentro de una caja de acrílico transparente, donde permanecerá el gas con el cual interacciona la radiación. Se eligió este material porque resiste a la exposición de radiación solar, al frío extremo, cambios súbitos de temperatura, a la mayoría de los productos químicos y gases industriales, es un excelente aislante eléctrico, posee transmisión de luz del 92%, lo cual facilita apreciar su contenido.

Dimensiones de la caja: $21.0 \times 21.0 \times 6.0 \text{ cm}^3$ (ver Figura 2.2). El grosor de la tapa es menor de 0.5 cm para permitir el paso de la radiación y el de las paredes de 1.0 cm . En el borde superior de la caja se colocó un O-ring de 0.3 cm de diámetro y la caja se cierra con tornillos bristol alrededor del O-ring, con el fin de obtener un sellado total e impedir que gas escape. En las paredes de la caja, se adecuaron dos racores de acople rápido, para la entrada y la salida del gas. También se instalaron conectores para las dos señales provenientes de los strips y para el Alto Voltaje (HV).

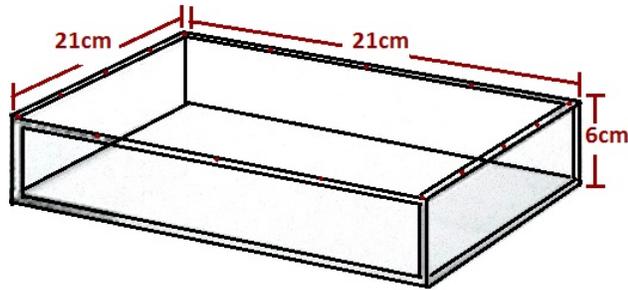


Figura 2.2: Diseño de la caja de acrílico

2.1.2. Modelo eléctrico

Al aplicarle alto voltaje al detector expuesto a radiación, el gas del gap es sometido a un campo eléctrico, donde las partículas ionizantes interactúan con este generando pares de iones. Estos iones se aceleran en dirección a electrodos polarizados con signo contrario y se genera corriente eléctrica, que es inducida en los electrodos del RPC [21]. El diagrama se puede apreciar en la Figura 2.3. La fuente de alto voltaje se conecta directamente a los electrodos, por medio de un conector de alto voltaje donde el cable de polaridad positiva va a la placa superior y el de polaridad negativa a la tierra, la placa inferior. La señal de salida de cada electrodo, se obtiene a través de conectores Lemo, el cable de polaridad positiva va a los strips y el de polaridad negativa a la tierra.

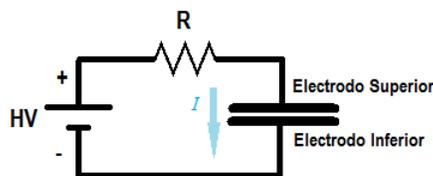


Figura 2.3: Configuración del circuito eléctrico del RPC. La fuente de alto voltaje se conecta a los electrodos, la conexión positiva a la placa superior y la conexión a tierra a la placa inferior. R es la resistencia de protección.

2.1.2.1. Electrodos

Los electrodos se construyeron con soportes de Baquelita, que es un material altamente resistivo para evitar producción de chispas y otros procesos peligrosos para el detector (por ejemplo descargas permanentes). Las dimensiones de las placas son de 13 cm×13 cm , y

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

2 mm de espesor. En la superficie externa, se graba la estructura de los strips mediante técnicas estándar de circuitos impresos. Cada strip tiene dimensiones $13\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ y su separación es de 1 mm (ver Figura 2.4). La superficie interna de las placas se recubrió con pintura de grafito, que permite la aplicación uniforme del alto voltaje [13], el espesor de esta película es $\sim 20\mu\text{m}$. En el extremo inferior de la placa se coloca una lámina de cobre para soldar las conexiones de alto voltaje (HV) y de tierra (ver Figura 2.5). Las placas de strips están orientadas en direcciones ortogonales para obtener mediciones en ambos planos. La señal inducida en cada placa es la suma de las señales producidas por cada strip y los pulsos tendrán diferente polaridad.

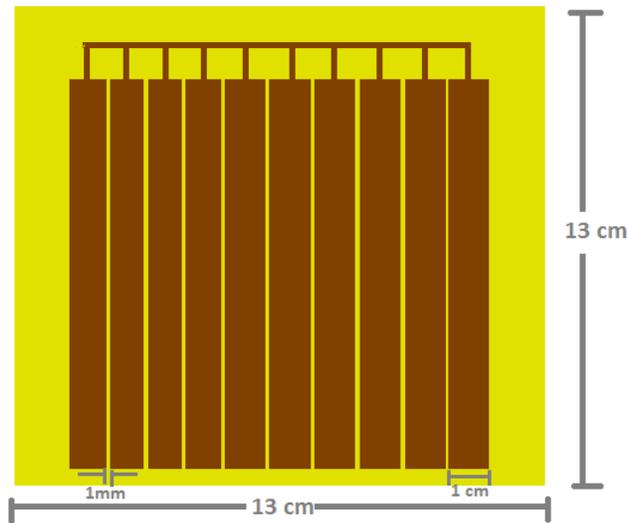


Figura 2.4: Diseño de la superficie externa de los electrodos, conformado por 10 strips acoplados y separados a 1 mm de distancia.

El circuito impreso se observa en la Figura 2.6. Se pintó la superficie interior con pintura de grafito utilizando una brocha pequeña y se colocó la lámina de cobre con tornillos.

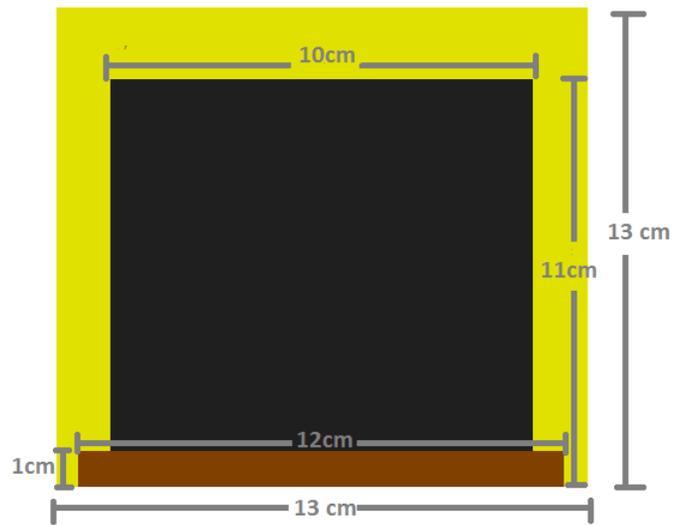


Figura 2.5: Diseño de la superficie interna de los electrodos. Se recubrió con pintura de grafito, para permitir la aplicación uniforme del alto voltaje. En el extremo inferior de la placa se coloca una lámina de cobre para soldar las conexiones de alto voltaje (HV) y de tierra.



Figura 2.6: Circuito impreso de los electrodos, consta de 10 strips comentados en paralelo. Se diseñó en el programa EAGLE y posteriormente se imprimió sobre la baquelita.

2.1.2.2. Espaciadores

Son utilizados para separar los electrodos y su material también tiene alta resistividad para evitar descargas dentro del detector. Los electrodos se ensamblaran con tornillos de plastico, que son aislantes electricos y el ancho del gap sera de $3mm$ que corresponde al grosor de la tuerca de plástico.

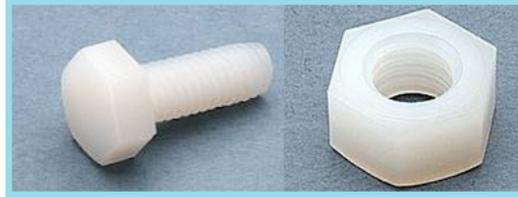


Figura 2.7: Tornillos y tuercas plasticas.

Los espaciadores de plástico (tuerca de plastico); tiene grosor de 3 mm. Posteriormente se realizan las conexiones del conector de alto voltaje al anódo y a tierra, al igual que para los conectores de las señales generadas por los strips. En la Figura 2.8 se muestra el detector RPC.

Después de fabricado el RPC, se prueba su funcionamiento con muones cósmicos para diferentes gases. De la interacción de la radiación con el gas se induce un pulso eléctrico en los strips de los electrodos y para extraer la información, la señal debe ser procesada por un sistema electrónico.

2.1.3. Gases de llenado

El estudio del comportamiento del detector se realizó con los gases Aire, Argón (Ar), Metano (CH_4) y la mezcla $P10$ (90% Ar +10% CH_4).

El aire puede ser utilizado dado que está compuesto principalmente por nitrógeno, oxígeno y argón que son gases con potenciales de ionización altos y son altamente electronegativos.

El argón (Ar) es un gas noble y suele ser elegido ya que requieren de intensidades de campo eléctrico muy bajas para la formación de avalanchas debido a su bajo energía de excitación [29] y además por su bajo costo.

El metano (CH_4) es un gas poliatómico, que actúa como desactivador mediante la absorción de los fotones, que son producidos por la desexcitación de los átomos y que se pueden generar avalanchas de cascada.

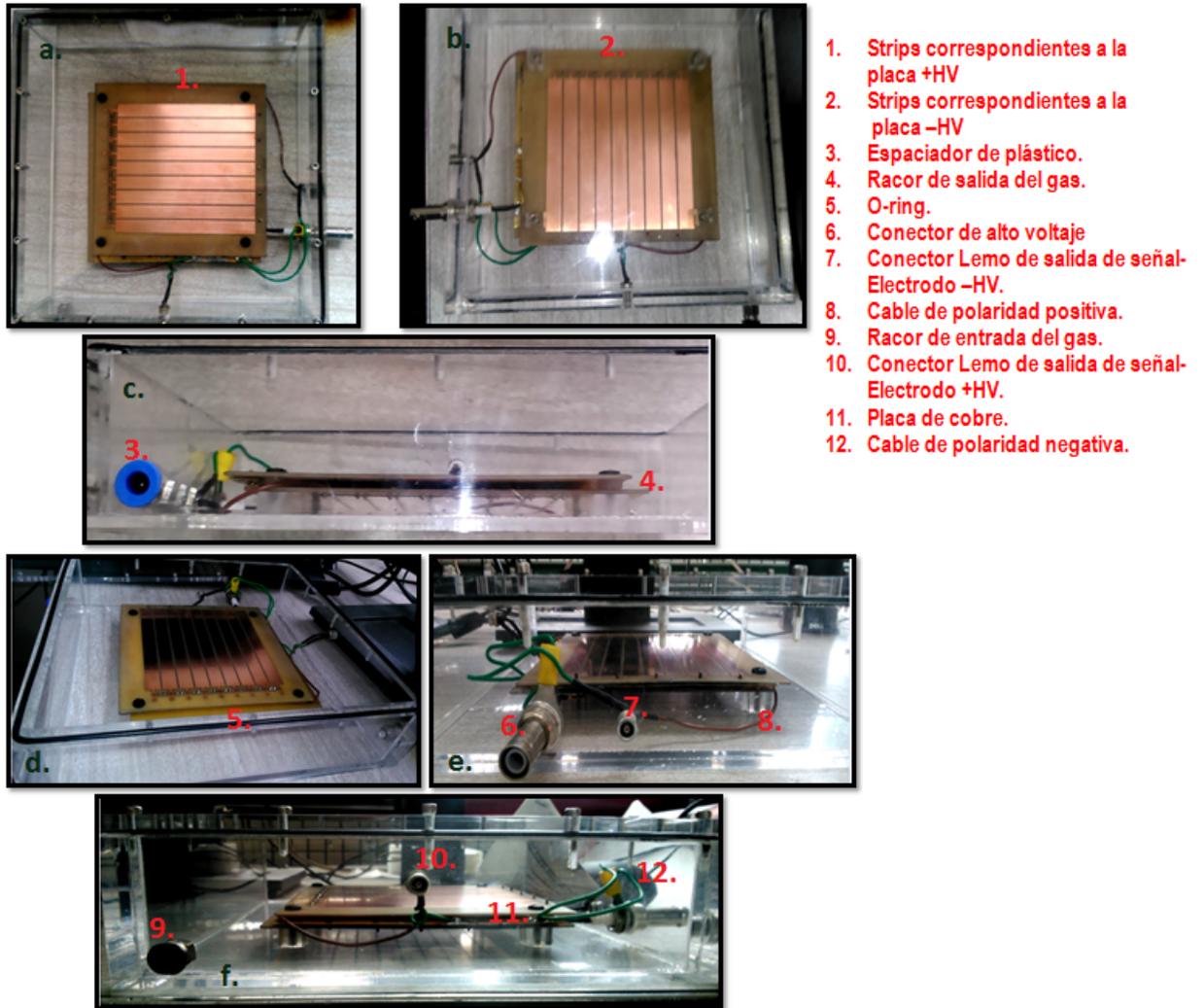


Figura 2.8: Imágenes del detector RPC ensamblado. **a.** Vista superior del RPC. **b.** Vista inferior del RPC. Los strips están orientados perpendicularmente con respecto a los de la placa superior. **c.** Vista lateral del RPC. Se puede apreciar el gap entre los electrodos debido a los espaciadores y el racor para la salida del gas. **d.** Se identifica el O-ring y los tornillos plásticos que acoplan los electrodos. **e.** Se observa el conector de alto voltaje y la señal de salida del conjunto de strips inferior. **f.** Se muestra el racor del entrada del gas y el conector de señal de salida del conjunto de strips superior.

La mezcla P_{10} (90% Ar +10% CH_4), es el mas apropiada para los detectores gaseosos, la presencia del compuesto orgánico contribuye a disminuir el camino libre medio de los electrones, aumentando su velocidad de deriva hacia el ánodo [23].

2.1.4. Montaje experimental

Mecánico

Consta de un rack de instrumentos, un soporte para el detector y un sistema de control de flujo de gas. Este sistema contiene dos flujómetros, DWYER escala: 0.06-0.5 l/min y Vogtlin escala: 0 – 10 N l/h un cilindro de Argón y otro de Metano. En la Figura 2.9, se puede observar el montaje para las pruebas realizadas al detector.

Electrónico

2.1.4.1. Lectura y tratamiento de los datos

El sistema de adquisición de datos para las pruebas del RPC fue diseñado y desarrollado con electrónica estándar NIM (Nuclear Instruments Modules), una fuente de alto voltaje y osciloscopio.

2.1.4.2. Módulos electrónicos para el procesamiento de señales.

Los módulos utilizados para la caracterización del RPC: Preamplificador, amplificador, discriminador, convertidor analógico-digital, y analizador multicanal (ver Figura 2.10). También se utilizó un osciloscopio digital de alta velocidad y una fuente alto voltaje.

Las especificaciones de los equipos utilizados se presentan a continuación:

- Preamplificador de carga:

Marca: CAEN

Referencia:A 1422

Descripción : 8 canales de salida.

La función básica de un preamplificador es (precisamente) amplificar las débiles señales de salida del detector y conformarlas para que puedan ser analizadas por el resto del equipo. Al mismo tiempo, debe agregar la menor cantidad posible de ruido a la señal. Debido a que la señal de entrada al preamplificador es muy débil, éste está ubicado lo más cerca posible del detector, de forma que se disminuya la longitud del cable conector. De esta manera se



Figura 2.9: Montaje experimental. Se muestra el rack de instrumentos. 1. Osciloscopio. 2. Electrónica estándar NIM. 3. Flujómetros. 4. Soporte para el detector. 5. Sistema de control de flujo de gas, flujómetro DWYER escala: 0.06-0.5 l/min, Flujómetro Vogtlin escala: 0 – 10 N l/h, manómetros y gas de argón y metano.



Figura 2.10: Módulos electrónicos para el procesamiento de señales. 1. Contador. 2. Fuente de alto voltaje. 3. Amplificador. 4. Discriminador. 5. Fuente de alimentación para el preamplificador 6. Preamplificador.

reducen la influencia de los campos magnéticos externos y la capacitancia del cable, la cual empeora la relación señal - ruido.

- Amplificador:

Marca: CAEN

Referencia: N979

Descripción: 16 canales. Cada canal cuenta con una ganancia fija de 10. Su impedancia de salida es de $50 \Omega \pm 2\%$ y $50 \mu\text{V}$ de ruido.

Su función principal es transformar la señal a una de mayor amplitud en un factor de ganancia.

- Discriminador:

Marca: CAEN

Referencia: N841

Descripción: 16 canales de polaridad negativa, acople DC, con un máximo de frecuencia de entrada de 110 MHz y 50Ω de impedancia y con un umbral de discriminación entre -1mV a -255mV . El pulso de salida del discriminador es TTL con una anchura ajustable en un rango de 5 ns a 40 ns.

Su función principal es rechazar los pulsos no deseados de un nivel de umbral, entre ellos el ruido electrónico.

- Osciloscopio:

Marca: LeCroy X-Stream Software, Digital.

Descripción: Pantalla touch, 4 canales, con alta resolución, 50Ω de impedancia y un ancho de banda de 15 MHz.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

- Fuente de alto Voltaje:

Marca: Ortec

Referencia: 556

Descripción: Bipolar, apropiada para trabajar con fotomultiplicadores, cámaras de ionización, detectores semiconductores y otros dispositivos. El voltaje de salida varía continuamente de 10 V a 3000 V.

2.1.5. Metodología experimental

Para la caracterización del RPC, se comprobó su funcionamiento con muones cósmicos y se operó con un flujo constante de gas a presión atmosférica. Para eliminar contenido de aire en la caja, se dejó fluir el gas por 10 minutos antes de realizar las mediciones.

Las mediciones se realizaron con la configuración experimental ilustrado en la Figura 2.11. El voltaje (V) se aumentó gradualmente hasta obtener pulsos en el osciloscopio, lo que permitió determinar el rango de voltaje en el que funciona el detector sin presencia de chispas para cada gas. Se inició el proceso de medida, registrando la amplitud del pulso obtenido directamente del detector para cada voltaje.

Se inició el proceso de medida, registrando la amplitud del pulso obtenido directamente de los strips mediante el osciloscopio para cada voltaje, se calculó la carga contenida en cada pulso para obtener la curva característica del detector y se realizó el conteo por minuto de muones en función del voltaje.

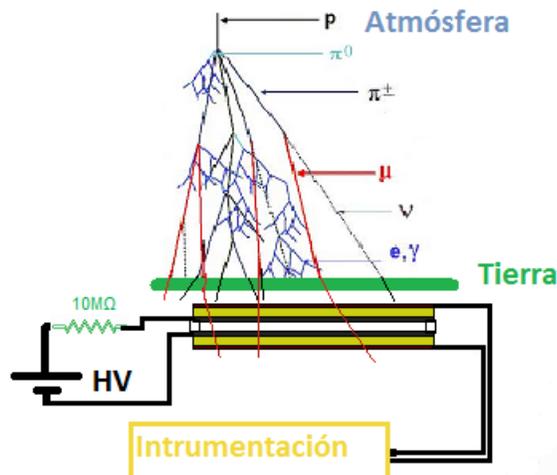


Figura 2.11: Configuración experimental para la caracterización.

2.2. Caracterización

El detector se caracterizó para las siguientes mezclas de gas: 100% Aire, 100% Argón, 100% Metano y P10, variando los voltajes hasta obtener el rango de operación para cada uno.

- Para analizar los pulsos obtenidos directamente del detector, las señales de salida del RPC se conectan directamente al osciloscopio, se registran los pulsos digitalizados y se mide la altura de cada pulso en función del voltaje.
- La curva característica de respuesta del RPC se obtuvo calculando el número de electrones colectados para cada voltaje. Se conectó la señal de salida del detector al preamplificador de carga y la señal amplificada al osciloscopio. Se registraron los pulsos para cada voltaje y se midió la altura de cada uno para determinar la carga colectada.
- El conteo de muones cósmicos se realizó por minuto (CPM). Se conectó la señal de salida del RPC al amplificador, esta señal amplificada se conectó al discriminador y posteriormente al contador el cual muestra el número de partículas detectadas. Se registró el número de cuentas a medida que se incrementaba el voltaje

En la Figura 2.12 se muestran las configuraciones para cada caracterización.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Análisis de pulsos

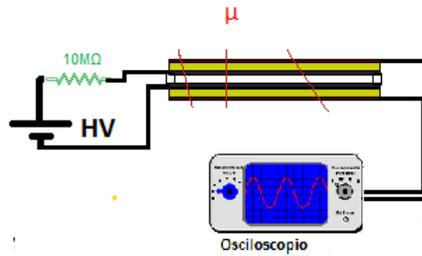
Para observar los pulsos inducidos en el detector se utilizó el dispositivo experimental mostrado en la Figura 2.12 a. Los pulsos observados en el osciloscopio se muestran en la Figura 2.13 :

En los strips correspondientes a la placa +HV el pulso inducido es negativo (amarillo).

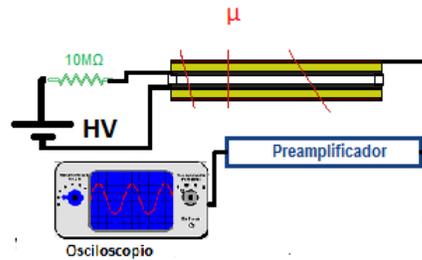
En los strips correspondientes a la placa -HV el pulso inducido es positivo (rosado).

El RPC produce una señal de polaridad negativa en los strips cercanos al cátodo y la señal de polaridad positiva a los strips cercanos al ánodo.

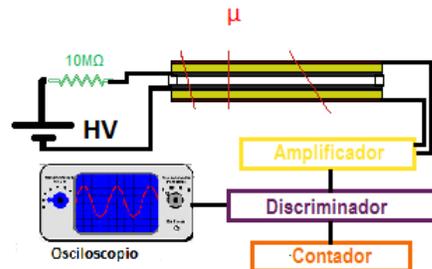
CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO



(a) Configuración experimental para observar los pulsos del RPC. Las señales inducidas en los strips del detector se conectan directamente al osciloscopio.



(b) Configuración experimental para obtener la curva característica. Se conectaron la señal de polaridad positiva del RPC al preamplificador y de la salida del preamp al osciloscopio.



(c) Configuración experimental para obtener conteo de muones. Las señales inducidas del RPC se conecta al amplificador. De la salida del amplificador, se conecta al discriminador, las dos salidas del discriminador se conectan al contador y al osciloscopio.

Figura 2.12: Configuraciones experimentales para caracterización del detector. a. Configuración experimental para observar los pulsos del RPC. b. Configuración experimental para obtener la curva característica. c. Configuración experimental para obtener conteo de muones.

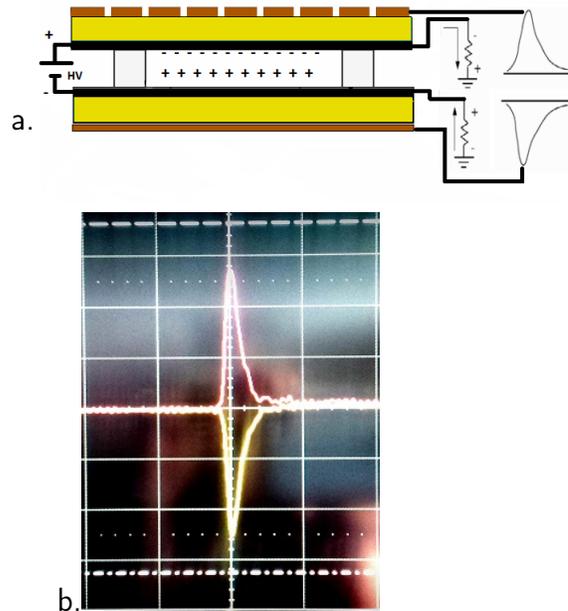


Figura 2.13: **a.** Formación de la señal en el RPC. Se induce una señal de polaridad negativa en los strips cercanos al cátodo y la señal de polaridad positiva a los strips cercanos al ánodo. **b.** Pulsos observados en el osciloscopio a 5 mV/div, 100 ns/div y trigger de -9,0 mV.

Los pulso para cada gas, se ilustra la Figura 2.14, donde se observa que para 1510 V, el pulso con mayor amplitud es el de la mezcla P10, seguido por el Metano, Argón y Aire.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

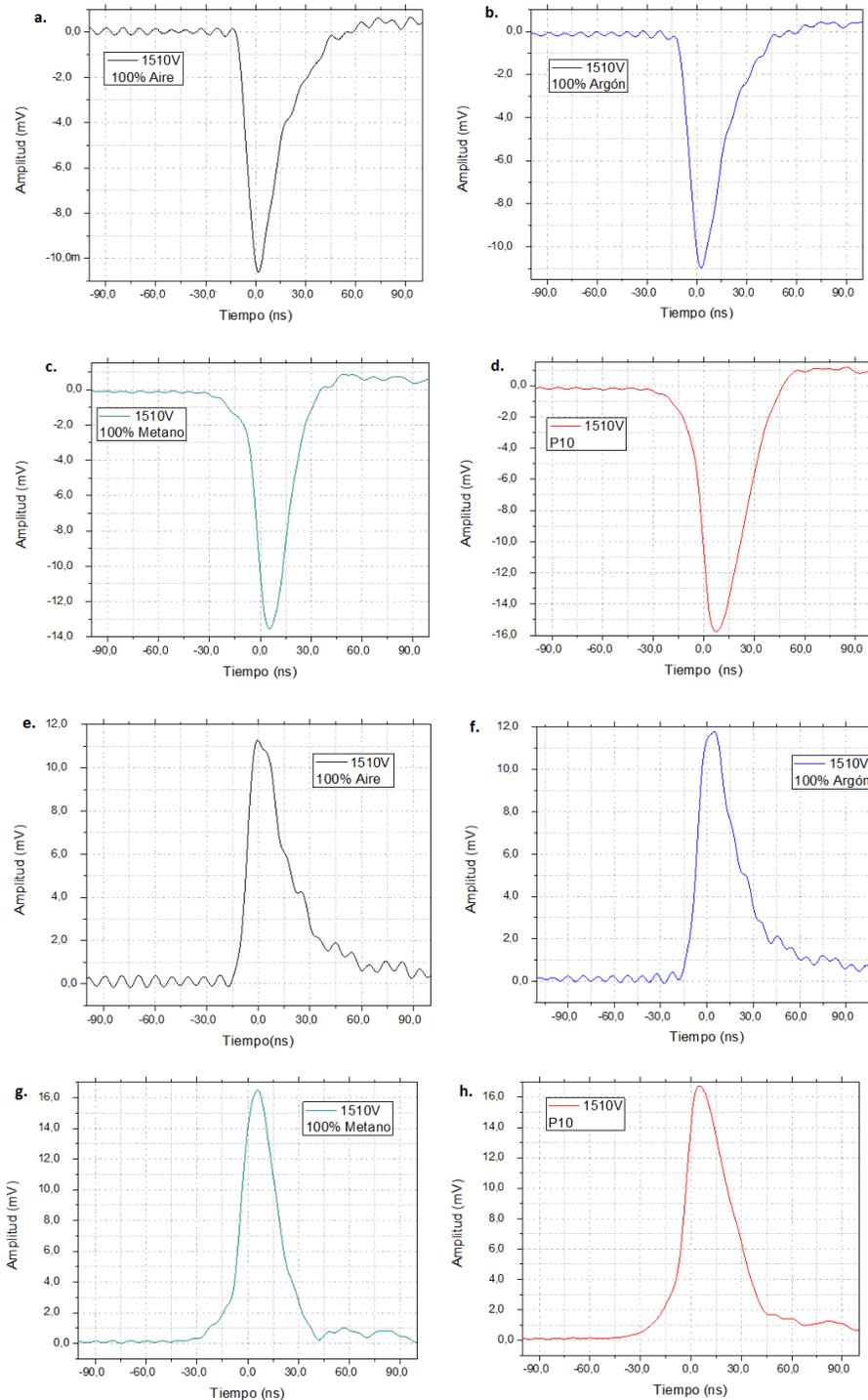


Figura 2.14: Pulsos para diferentes gases a 5 mV/div, 100 ns/div y trigger de -9, mV. **a.** Pulso para 100% Aire-polaridad negativa para 1510V. **b.** Pulso para 100% Argón-polaridad negativa para 1510V. **c.** Pulso para 100% Metano-polaridad negativa para 1510V. **d.** Pulso para P10-polaridad negativa para 1510V. **e.** Pulso para 100% Aire-polaridad positiva para 1510V. **f.** Pulso para 100% Argón-polaridad positiva para 1510V. **g.** Pulso para 100% Metano-polaridad positiva para 1510V. **h.** Pulso para 100% P10-polaridad positiva para 1510V.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

Al aumentar gradualmente el voltaje se observó el aumento en la amplitud de los pulsos y se determinó el voltaje de operación del detector para cada gas (ver Figura 2.15), este es el rango en el que el RPC funciona sin presentar chispas y los pulsos no presentan deformación. El análisis se realizó con los pulsos de polaridad negativa, determinando la altura del pulso a medida que se incrementaba el voltaje en 30 V, para cada medición.

Los rangos de voltaje de operación, en los que funciona el detector, sin presencia de chispas, se muestran en el Tabla 2.1. Para cada gas el detector funciona en un rango de voltaje diferente y esto se debe a que cada uno tiene un potencial de ionización distinto y constante dieléctrica diferente. El Argón presenta el menor intervalo de operación debido a que es altamente ionizable y presenta descargas rápidamente al aumentar el voltaje a diferencia del P10 que es el más estable ya que la presencia del compuesto orgánico que absorbe los fotones y disipa la energía de ionización, de manera que su rango de operación es mayor.

Gas	Rangos de voltaje de operación (V)
Aire	1500-2100
Argón	1380-1750
Metano	1200-1800
P10	1070-1700

Tabla 2.1: Rangos de voltaje de operación para cada gas.

2.3.2. Curva Característica de repuesta

El funcionamiento de los detectores gaseosos depende de la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos. Para identificar en qué región opera el RPC se realizó el montaje que se muestra en la Figura 2.12 b, se utilizó el preamplificador y el osciloscopio para observar la señal (ver Figura 2.16). La gráfica del número de iones colectados vs Voltaje, representa la curva característica del detector.

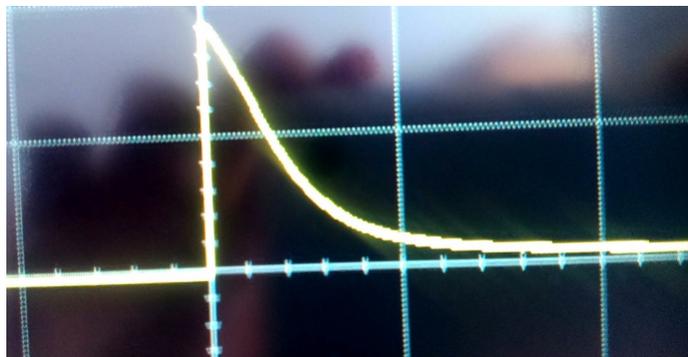


Figura 2.16: Señal del RPC obtenida con el preamplificador a 200 mV/div, 500 μ s/div. La altura del pulso representa la carga integrada del pulso de salida del detector.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

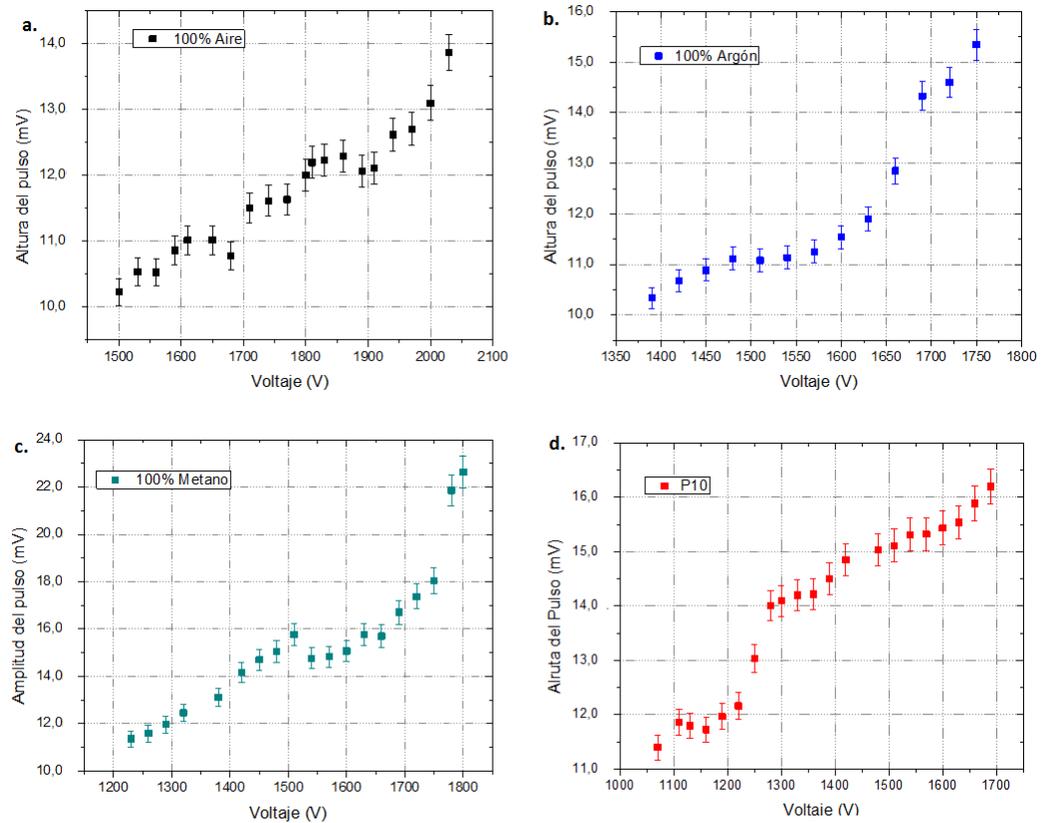


Figura 2.15: Gráficas de Altura del pulso (polaridad negativa) vs Voltaje con diferentes gases. Se observa la proporcionalidad de la altura del pulso con el voltaje aplicado. **a.** En el rango 1900-2030 V se observa un gran aumento del pulso y se presentan regiones donde se mantiene estable como: 1600-1650 V **b.** En el rango 1380-1600 V se presenta un aumento leve, mientras que de 1600-1750 V se presenta un notable incremento del pulso. **c.** Un incremento lineal se observa en el rango de 1230-1510 V mientras que de 1740-1770 V el pulso aumenta notablemente. **d.** En la región de 1260-1690 V se presenta un aumento lineal de la altura del pulso. P10 presenta el mayor rango de linealidad.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

La función principal del preamplificador es extraer la señal del detector sin degradar significativamente la relación intrínseca de señal-ruido y es utilizada para integrar la carga en el pulso en la salida del detector. El preamplificador utilizado es sensible a la carga y su ganancia no depende del cambio en la capacitancia del detector, donde el tiempo de subida del pulso de salida, es igual al ancho del pulso de corriente del detector (Ver Apéndice). El número de electrones colectados es

$$N_e = \frac{Q}{e}. \quad (2.1)$$

La gráfica del número de electrones colectados en función del voltaje para cada gas se muestra en la figura 2.17.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

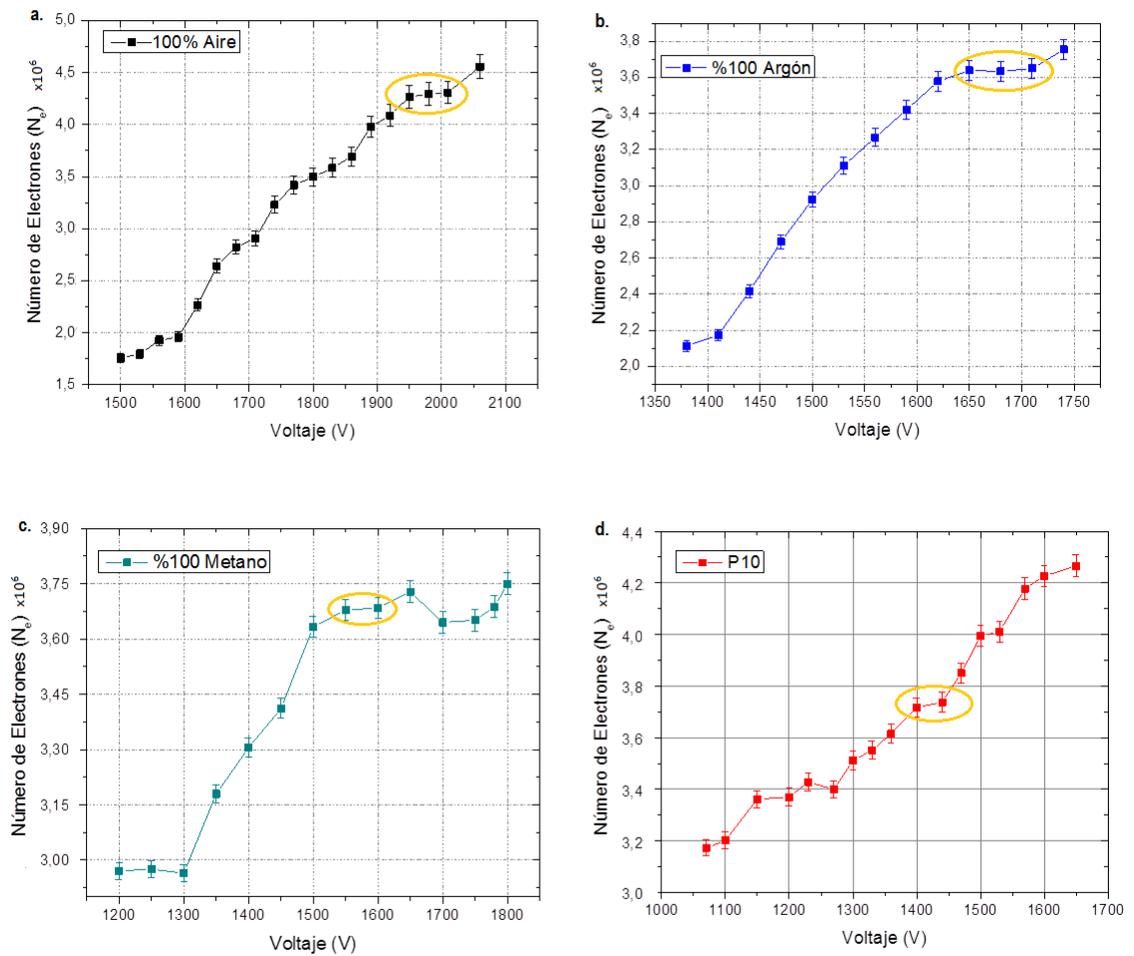


Figura 2.17: Número de Electrones colectados en función del Voltaje para cada gas. Las ganancias obtenidas para cada gas, son del mismo orden de magnitud 10^6 y se puede concluir que el detector opera en la región de contador proporcional.

a. Aire: La señales inducidas en el RPC para un flujo constante de 6L/h de aire, se observan en un rango de voltaje de 1500-2010 V y los pulsos en el osciloscopio son obtenidos a $500\mu s/div$, $200 mV/div$. A medida que se incrementa la tensión aplicada los iones adquieren suficiente energía para ionizar el gas en su desplazamiento hacia los electrodos, produciendo el fenómeno de multiplicación [key-2], como se muestra en la gráfica, el aumento de la carga colectada a medida que aumenta el voltaje, encontrándose así en una zona de proporcionalidad. En la región de 1950 V a 2000 V se presenta estabilidad. A partir de 2100V, se presentan deformaciones en los pulsos. La intensidad del campo eléctrico generado en el RPC es del orden de $10^5 N/C$ y el factor de multiplicación es de 10^6 .

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

b. Argón (*Ar*): En la gráfica, se observa que el rango de operación del RPC con un flujo constante de 6L/h de argón va 1380 V a 1750 V. En la región comprendida entre 1420-1650 V se incrementa el número de electrones colectados a medida que se amplía el voltaje, produciéndose una avalancha por cada par de electrones primario, característica de la región proporcional. Presenta estabilidad en el rango de 1650-1710 V. A partir de los 1750 V la cámara empieza a descargarse generando chispas y el número de iones colectados disminuye. La ganancia es del orden de 10^6 .

c. Metano (*CH₄*): El RPC fue operada con un flujo constante de 6 L/h. Se observan pulsos en el osciloscopio (500 ns/div , 200 mv/div) a partir de 1200 V. Al llegar a 1800 V se presenta deformación de los pulsos. En la a curva característica, la zona de 1200 V hasta 1300 V, hay un aumento proporcional del número de electrones en función de la tensión aplicada, opreando en modo avalancha. En las regiones 1200 V-1300V y 1500 -1650 V no se presenta mayor incremento de carga y en el intervalo de 1650 V-1750 V hay una reducción no muy grande del pulso; que puede deberse a que la mayoría de los electrones colisionan con las moléculas del gas sin ionizarlas.

d. P10 (90%*Ar* + 10%*CH₄*) : De la curva de carga vs voltaje, mostrada en la gráfica (d) se observa que crece lentamente en el rango de 1070-1650 V, produciéndose el fenómeno de multiplicación, que es característico de la zona proporcional; el número de electrones que llegan a los electronos es igual nM , donde n es el número de iones primarios y M es el factor de multiplicación que en este caso es igual a 10^6 . La escala de los pulsos observados en el osciloscopio es de 200 mV/div y 500 μ s/div.

De las curvas características mostradas en la Figura 2.17, se puede resaltar que para los gases Aire, Argón, Metano y P10 el factor de multiplicación es del orden de 10^6 , de manera que el régimen de funcionamiento del RPC es en modo avalancha, presentándose el fenómeno de multiplicación de carga y clasificándolo en la zona de contador proporcional.

El comportamiento estable en la multiplicación es necesario, por que las señales se repiten y reproducen en el tiempo de manera predecible. La zonas de ganancia estable para cada gas se puede apreciar en la Tabla 2.2.

La mezcla P10 en comparación a los otros gases presenta mayor rango de operación, debido a la presencia del metano que evita la fotoionización en el gas. A diferencia del argón que opera en el menor rango de voltaje, debido a su alto potencial de ionización y a los fotones emitidos cuando se desexcitan las moléculas que generan descargas continuas. La ganancia del metano es sutilmente mayor a la del argón pero requiere de mayor voltaje para generar una ionización y el fenómeno de multiplicación de carga. Y finalmente el aire con una ganancia intermedia, también se necesitan aplicar altas tensiones para que opere en modo avalancha.

Gas	Ganacia $\times 10^6$	Voltaje (V)
Aire	4.40	1990
Argón	3.32	1650
Metano	3.66	1550
P10	4.00	1400

Tabla 2.2: Ganacias de cada gas en zonas de estabilidad

2.3.3. Curva de Conteo

La curva de conteo se obtiene registrando el número de muones que detecta el RPC en función del voltaje con el dispositivo experimental de la Figura 2.12c.

Se ajustó el valor de discriminación para disminuir el ruido, rechazando pulsos que están por debajo de cierto nivel de umbral, que se escogió, observando el comportamiento de conteo con el umbral (V_{THR}) para un voltaje constante como se muestra en la Figura 1.18. El intervalo de V_{THR} en el que se realizaron las mediciones fue [200 mV-230mV] donde se presenta buena estabilidad.

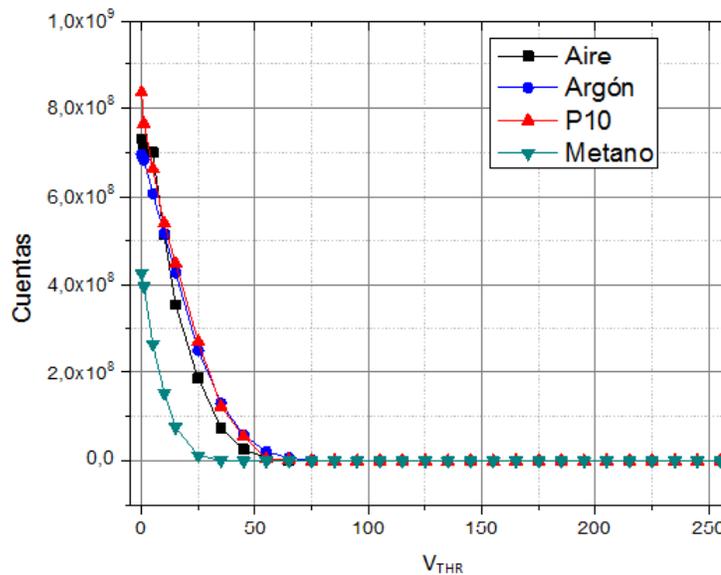


Figura 2.18: Gráfica de Cuentas en función de V_{THR} para cada gas a un voltaje constante para Aire de 1800V, Argón de 1500V, Metano de 1500V y P10 de 1300V.

El conteo los muones cósmicos, se realizó en intervalos de tiempo de un minuto para todos los gases. Se tomaron 3 datos por cada voltaje, calculando un valor promedio, la desviación

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

estándar y la tasa de conteos. Se graficó el número de cuentas por minuto (CPM), en función del voltaje ver Figura 2.18.

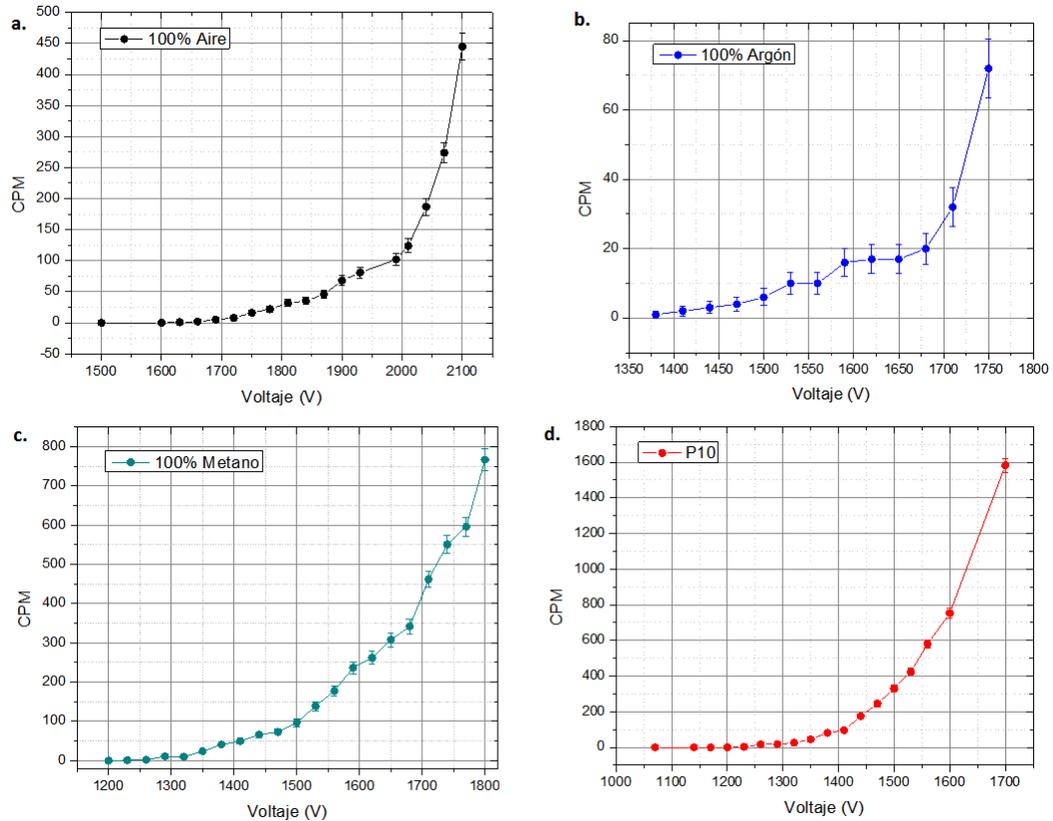


Figura 2.19: Cuentas por minuto en función del voltaje para cada gas. Se observa que a medida que se aumentan la tensión aplicada, el número de muones detectados es mayor.

En la gráfica 2.19 se muestra que el número de muones detectados por el RPC depende del gas y de la tensión aplicada.

a. Para el aire el número de muones por minuto detectados es de 445 para un voltaje de 1800 V, después de este voltaje se presentan chispas y el conteo no es confiable. $V_{THR}=230$ mV.

b. En la región 1590-1650V se observa estabilidad en el número de muones detectados y en la zona comprendida entre 1710-1750V hay un incremento notorio de partículas detectadas. El número máximo de muones detectados es de 72. $V_{THR}=200$ mV.

c. Con el gas de metano se presentan una zona de estabilidad en el rango 1290-1320V , también se observa un incremento grande de detección a medida que se aumenta la tensión aplicada. Para el voltaje máximo de operación se detectan 767 muones por minuto.

CAPÍTULO 2. EXPERIMENTO

$V_{THR}=210$ mV.

d. Para la mezcla P10 se observó conteo de muones en 2300V, a medida que se incrementa el voltaje, el número de cuentas aumenta representativamente. Se presenta una zona de estabilidad para la región 1260V-1290V. El número de muones por minuto detectados es de 1583 para un voltaje de 1700 V. $V_{THR}=210$ mV.

En la sección 1.2 se mencionó que el número de muones que llegan a la tierra al nivel del mar es de $I \approx 1 \text{ cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ para detectores horizontales, para el caso del RPC que tiene un área sensible de 100 cm^2 se espera que sean detectados 100 muones por minuto. El número de conteos para cada gas, antes de que el detector presente chispas. Se puede observar que el aire, metano y argón sobrepasan este valor, que puede ser producido por el exceso de avalanchas y número de fotones generados por la desexcitación de las moléculas y que desmejoran la tasa de conteo. Teniendo en cuenta los voltajes a los que se presenta conteo de 100 muones, para el aire a 1900 V, el metano a 1550 V, y la mezcla P10 a 1400 V y comparando con la curva característica de respuesta, para estos voltajes el número de electrones colectados se encuentran en una región de estabilidad y presentan buena ganancia. Para el aire de 4.40×10^6 , el metano 3.66×10^6 y P10 4.00×10^6 .

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un detector gaseoso tipo Resistive Plate Chamber (RPC) de tamaño $21.0\text{cm} \times 21.0\text{cm} \times 6.0\text{cm}$. Se realizaron pruebas de caracterización con cuatro tipos de gases: 100 % aire, 100 % Argón (Ar), 100 % metano (CH₄), y la mezcla P10 (90 % Ar + 10 % CH₄).

El análisis de los resultados obtenidos de la curva característica de respuesta muestra que para todos los gases el factor de multiplicación es del orden de 10^6 , de manera que el régimen de funcionamiento del RPC es en modo avalancha, presentándose el fenómeno de multiplicación de carga y clasificándolo en la zona de contador proporcional.

La mezcla P10 en comparación a los otros gases presenta mayor rango de voltaje de operación (1070-1700 V) sin presentar chispas, debido a la presencia del metano que evita la fotoionización en el gas y presenta mas de una región de ganancia estable.

Los voltajes que se presenta este conteo cercano a los 100 muones, presentan una región de estabilidad de ganancia, apta para realizar mediciones. Para aire 4.40×10^6 , Argón 3.32×10^6 , metano 3.66×10^6 y P10 4.00×10^6 .

Aunque este tipo de detectores han sido implementados con gran éxito en varios experimentos de altas energías y en aplicaciones de física medica por sus ventajas de bajo costo, fácil construcción, alta eficiencia $> 90\%$ y tiempos de resolución $\sim 1\text{ns}$, el campo de investigación sigue abierto a discusión en pro del su optimización.

Se espera en un futuro realizar mediciones de eficiencia y probar el RPC con rayos x y otros tipos de radiación, con el fin de utilizarlo para investigación tanto de altas energías como de física médica.

Apéndice A

Calculo del Número de Electrones

El voltaje de salida del preamplificador tiene una amplitud V_0 , y una constante de tiempo de decaimiento τ_f , dada respectivamente por:

$$V_0 = \frac{Q_D}{C_f} \quad y \quad \tau_f = R_f C_f, \quad (\text{A.0.1})$$

donde Q_D es la carga liberada por el detector, C_f es el condensador de realimentación (0,1 a 5 pF), y R_f es la resistencia de realimentación. El preamplificador debe estar ubicado lo mas cerca posible al detector para reducir así la capacitancia de entrada causada por el cableado, bucles de tierra y la recolección de frecuencia de radio, los cuales son fuentes de ruido para el preamplificador. La sensibilidad se expresa generalmente en mV por MeV de energía depositada en un material. La carga liberada por el detector es una función del fotón o energía de las partículas y el material del detector, y se da por

$$Q_D = \frac{Ee \times 10^6}{\epsilon}. \quad (\text{A.0.2})$$

Donde E es la energía en MeV de la radiación incidente, e es la carga de un electrón de $1,602 \times 10^{-19}C$, donde 10^6 convierte MeV a eV, y ϵ la cantidad de energía requerida para producir un par electrón-agujero en el detector. El preamplificador fue calibrado con un detector de sicio, entonces $\epsilon = 3,62eV$ y la carga Q_D es

$$Q_D = \frac{1MeV(1,602 \times 10^{-19}C) \times 10^6}{3,62eV} = 4.42 \times 10^{-14}C.$$

La ganancia del preamplificador esta definida como

$$G = \frac{V}{Q_D}, \quad (\text{A.0.3})$$

APÉNDICE A. CALCULO DEL NÚMERO DE ELECTRONES

donde $V = 45mV/MeV$ es el voltaje de salida del preamplificador, entonces $G = 1,02 \times 10^{15}mV/C$. Entonces la carga liberada a un determinado voltaje

$$Q = \frac{V}{1,02 \times 10^{15}mV/C}, \quad (\text{A.0.4})$$

y el número de electrones colectados es

$$N_e = \frac{Q}{e}. \quad (\text{A.0.5})$$

Apéndice B

dE/dX para Muones

Una partícula cargada puede ser detectada si interacciona (y pierde energía) en el medio. La forma más eficaz de perder energía es mediante colisiones discretas con los electrones del absorbente, sin modificar su trayectoria. La energía transferida depende de la energía de ligadura de los electrones que queda parametrizada en la cantidad I (potencial medio de ionización).

El poder de frenado, representa la pérdida de energía por la partícula por unidad de recorrido (Ecuación Bethe-bloch). Cuando dE/dx esta en unidades de espesor másico, se encuentra que varia muy poco sobre un amplio rango de materiales; entonces la formula de Bethe-Bloch se expresar como:

$$-\frac{dE}{d\varepsilon} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = z^2 \frac{Z}{A} f(\beta, I).$$

En C++ se programo la función

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 0,1535 \frac{Zz^2}{A} \frac{2}{\beta^2} \left[\ln \frac{W_{max}(\beta)}{I} \right] - \beta^2,$$

y

$$W_{max}(\beta) = 1,022 \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} MeV.$$

La gráfica 4.1 obtenida para muones en Aire, Argón, Metano y P10

Como se puede observar para los cuatro gases, el valor mínimo de dE/dx para muones es el mismo para una energía de 100 eV.

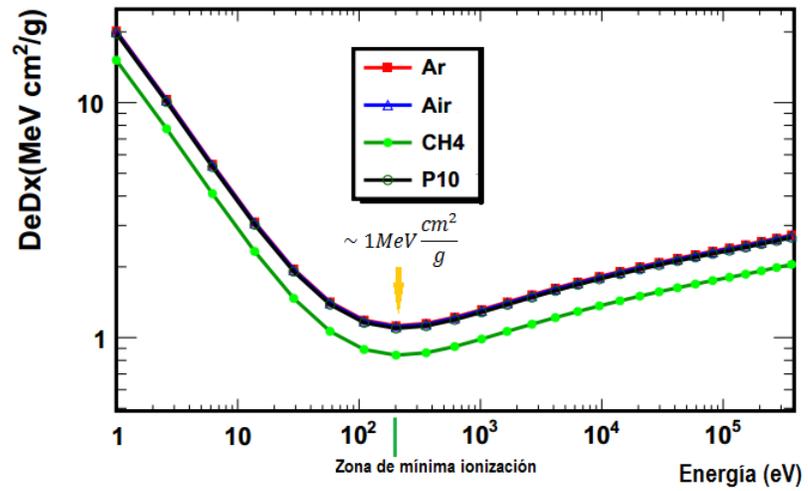


Figura B.1: Gráfica dE/dX para muones.

Bibliografía

- [1] Gonzalez, D., Sharma, A. (2014). Challenges towards RPC 2014 for Resistive Gaseous Detectors. *Journal of Instrumentation*. Vol 8.
- [2] The CMS Collaboration. Performance Study of the CMS Barrel Resistive Plate Chambers with Cosmic Rays. arXiv:0911.4045v2[Physics.ins-det]. 5 Jan 2010.
- [3] Font, P. Applications and new developments in Resistive Plate Chambers. IEEE Nuclear Science Symposium, submitted to IEEE Trans. Nucl. Sci. 5
- [4] Repond, José. Resistive Plate Chambers for Imaging Calorimetry – the DHCAL. Submitted on 28 Apr 2014. *Instrumentation and Detectors (physics.ins-det); High Energy Physics - Experiment (hep-ex)*. Cite as: arXiv:1404.7046 [physics.ins-det].
- [5] RPC–PET: Status and perspectives *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* Volume 580, Issue 2, 1 October 2007, Pages 915–918
- [6] *Imaging 2006 — Proceedings of the 3rd International Conference on Imaging Techniques in Subatomic Physics, Astrophysics, Medicine, Biology and Industry*.
- [7] Sharma, A. Summary of RPC 2007 the IX International Workshop. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 602 (2009) 854-859.
- [8] Santonico, R., Cardarelli, R. Development of resistive plate counters. *Nuclear Instruments and Methods*. 187 (1981) 377-380.
- [9] *Atomic Sources And Detectors. Methods Experimental Physics* Volume 4-Part A. Copyrighted material.
- [10] Construction and operation of a small multiwire proportional chamber. This article has been downloaded from IOPscience. 2005 *J. Phys.: Conf. Ser.* 18 36.

- [11] M. Hoch. Trends and new developments in gaseous detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 535 (2004) 1–15. CERN, Geneva 23, Switzerland.
- [12] E. Cerron Zeballos , I. Crotty , D. Hatzifotiadou , J. Lamas Valverde. (1995). A NEW TYPE OF RESISTIVE PLATE CHAMBER: THE MULTIGAP RPC. EUROPEAN ORGANISATION FOR NUCLEAR RESEARCH.
- [13] V. Peskov, D.F. Anderson and S. Kwan.High Counting Rate Resistive-Plate Chamber. Fermi National Accelerator Laboratory P.O. Box 500, Batavia, Illinois 60510.May 1993.
- [14] C. Bacci, C. Bencze, R. Cardarelli, F. Ceradini , G. Ciapetti, A. Di Ciaccio, F. Lacava, A. Nisati, D. Orestano, E. Petrolo, L. Pontecorvo, E. Radermacher, R. Santonico, C. Seez a'Z, F. Szoncsó, S. Veneziano, M. Verzocchi, G. Walzel, G. Wrochna 3, C.E. WUIZ, L. Zanello.Test of a resistive plate chamber operating with low gas amplification at high intensity beams. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 352 (1995) 552-556.
- [15] Widgoff, M., Aleya E. (1992). Resistive Plate Chamber Thechnology Review. GEM NT 92-206. Rev A.
- [16] G.F. Knoll: Radiation Detection and Measurement, J. Wiley&Sons, New York 1989.
- [17] Qingming Z, Yifang Wang, Jiawen Zhang. An underground cosmic-ray detector made of RPC. Nuclear Instruments and Methods in Physic Research A 508 (2007)278-284.
- [18] S. Tavernier, Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics, 1 DOI 10.1007/978-3-642-00829-0_1, C Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [19] W.R.Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York.
- [20] A. Ferrer, E. Ros. Física de partículas y astropartículas. PUV. Editorial Maite Simón.
- [21] C.Grupen, B. Shwarz. Particle Detectors. Second Edition. Cambridge.
- [22] K.V. Mittal, R.C.Verma, S.C.Gupta. Introduction to Nuclear and Particle Physics. Eastern Economy Edition.2009.
- [23] A. Fernandez. La física de altas energías en el Fermilab. Universidad Autonoma de Puebla.
- [24] D.N.Poenaru, W. Greiner. Experimental Techniques in Nuclear. W de G.
- [25] G. Charpak y F. Sauli, Nuclear instruments methods. 162, 405 (1979)

BIBLIOGRAFÍA

- [26] S.S.Kapoor. V.S Ramamurthy. Nuclear Radiation Detectors. Copyright.1986.New Age International Ltd.Publishers.First edition:1986. Reprint:2005.
- [27] M. Barone, E. Borch, C. Leroy. Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications.World Scientific Publishing. 2004. Printed in Singapore.
- [28] R.Fernow. Introduction to experimental particle physics. Cambridge University Press 1986. New York.
- [29] Bheesette S. Paper titled: Design and Characterisation Studies of Resistive Plate Chambers. Department of Physics INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY BOMBAY, INDIA 2009.
- [30] I. Ahmed. Tesis Doctoral "TESTING OF CMS ENDCAP RPC AND DETERMINATION OF THE TOP QUARK MASS FROM HIGH PT JETS AT LHC". Islamabad, Pakistan. Junio 2007.
- [31] Asmita Redij. Fabrication and characterisation of Resistive Plate Chamber. Scientific Officer. As a part experimental physics course.
- [32] R.Cardarelli et al., NIMA 263, (1988), 20.
- [33] V.Amosov et al., arXiv:hep-ex/0204026, (2002).
- [34] G.L.Bruno, Ph.D. Thesis, (2000-2001).
- [35] R.Cardarelli et al., NIMA 333, (1993), 399.
- [36] R.Cardarelli et al., NIMA 382, (1996), 470.
- [37] Christian Lippmann, Ph.D. Thesis, (2003).
- [38] P.Fonte, IEEE Trans. on Nucl. Sci. 49 (2002), 881.
- [39] E.C.Zeballos et al., NIMA 392, (1997), 150.
- [40] CMS Collaboration, CERN/LHCC 97-32, (1997).
- [41] V.Peskov and P. Fonte, Proc. Intl. Conf. on Position-Sensitive Detectors, London, England, (1999).
- [42] L3 Collaboration, NIMA 456, (2000), 113.
- [43] BaBar Collaboration, NIMA 479, (2002), 1.
- [44] M.Yamaga et al.Novaes, S. "Standard Model: An Intro, NIMA 456, (2000), 109.

BIBLIOGRAFÍA

- [45] OPERA Collaboration, OPERA Proposal CERN/SPSC 2000-028, (2008); NIMA 602, (2009), 631.
- [46] ALICE Collaboration, NIMA 604, (2009), 301.
- [47] AUGER Collaboration, Proc. Workshop on RPCs and Related Detectors, Pavia, (1995).
- [48] LHCb Collaboration, CERN-LHCC-2001-010, (2001).
- [49] David Griffiths. "Introduction to Elementary Particles". John Wiley & Sons N. York, 1987.
- [50] Cosmic Rays. Particle Data Group. Revised August 2011 by J.J. Beatty (Ohio State Univ.) and J. Matthews (Louisiana State Univ. and Southern Univ.); revised August 2009 by T.K. Gaisser and T. Stanev (Bartol Research Inst., Univ. of Delaware).