



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA PROPORCIONAL DE MULTIALAMBRES (MWPC)

Maritza Juliette Delgado González

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

2014

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA PROPORCIONAL DE MULTIALAMBRES (MWPC)

Maritza Juliette Delgado González

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias - Física

Director:
Héctor Fabio Castro Serrato

Grupo de Investigación:
CRYOMAG y Física Médica

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

2014

A mi mamita, mi papito y mi hermanita.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi director, el profesor Héctor Castro, su dedicación en la elaboración de este trabajo, sus críticas constructivas y experiencia en el campo de detectores de partículas.

A mis compañeros y amigos del grupo de CRYOMAG que hicieron parte en los distintos congresos y eventos en los que se presentó este trabajo.

Al grupo de trabajo del Taller de Mecánica Fina del Departamento de Física en especial a Miguel Casas.

Agradezco igualmente a Colciencias por la financiación parcial de este trabajo mediante el PROYECTO No. 110152129367. Agradecimientos también al Área Curricular y la Dirección del Departamento de Física y a la División de Bienestar de la Facultad de Ciencias por el apoyo económico para la asistencia a varios eventos científicos.

Resumen

En este trabajo se diseñó, construyó y caracterizó un detector gaseoso de partículas tipo “cámara proporcional multialambres”, conocida por sus siglas en inglés como MWPC. Este trabajo fue desarrollado en el laboratorio del grupo Cryomag del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. En primer lugar se construyó el prototipo en una caja de acrílico con cierre hermético, en la cual se introdujo el circuito electrónico del detector, en una atmósfera de gas apropiado. Una vez verificado su funcionamiento mecánico y eléctrico, se realizó la caracterización como detector de partículas. Para ello se analizaron los pulsos obtenidos. Posteriormente se midió la curva característica del detector, consistente en la medición de la carga eléctrica colectada en los electrodos en función del Voltaje aplicado. Finalmente se midió la curva de conteo en función del voltaje, más conocida como “curva Plateau”, mediante el conteo de muones provenientes de radiación cósmica. Estas mediciones se realizaron con diferentes mezclas de gases dentro de la cámara: 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 para voltajes entre 3700 V y 4000 V. Por otro lado, de la curva de Plateau, se dedujo que el voltaje óptimo de operación del detector es de 3850 V. Los mejores resultados obtenidos fueron para la cámara con una mezcla 90%Ar + 10% CH₄.

Palabras Clave: Cámara proporcional de Multialambres, rayos cósmicos, curva característica, detector gaseoso.

Abstract

In this work we have designed, built and characterized a gaseous particle Detector of the type "multiwire proportional chamber", known as MWPC. This work was made at the laboratory of Cryomag group in the Physics Department of the National University of Colombia. First, the prototype was constructed in a hermetically sealed acrylic box, which was placed the electronic circuit of the detector, in an atmosphere of appropriate gas. Once the mechanical and electrical operation was verified we performed the characterization as particle detector. For this purpose we measured the characteristic curve of detector consisting of the electrical charge collected at the electrodes as a function of applied voltage. Finally we measured the counts versus voltage, known as Plateau curve by counting muons from cosmic radiation. These measurements were performed with different mixtures of gases inside the camera: 100% Air, 100% Ar, 100% CH₄ and 90% Ar + 10% CH₄. The characteristic curve showed that this detector works in the proportional region for voltages between 3700 V to 4000 V. From the Plateau curve, we deduce that the optimal operating voltage is 3850 V. The best results were obtained with the mixture 90% Ar + 10% CH₄.

Keywords: Multiwire proportional chamber, cosmic rays, characteristic curve of MWPC, gaseous particle detector.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract	VI
Introducción	1
Estado del arte	4
Objetivos	7
1. Marco teórico	8
1.1 Características generales de los detectores de partículas.	8
Sensibilidad.....	8
Respuesta del detector.....	8
Resolución energética.....	8
Eficiencia.....	10
1.2 Física de los detectores gaseosos.....	11
1.2.1 Difusión de iones y electrones sin campo eléctrico.....	13
1.2.2 Movilidad de iones.....	15
1.2.3 Difusión de electrones.	17
1.2.4 Producción de pares.....	18
1.2.5 Fenómeno de sofocación (Quencher).....	19
1.3 Muones Cósmicos.....	19
1.4 Curva característica de respuesta.....	21
1.5 Selección del gas de llenado.....	23
1.6 Cámara proporcional Multialambres.....	24
1.6.1 Modo de operación de Streamer.....	28
2. Experimento	30
2.1 Diseño del detector:.....	30
2.1.1 Diseño eléctrico.....	31

2.2	Construcción del detector.....	32
2.2.1	Caja del detector.....	33
2.2.2	Elección del gas de llenado:.....	35
2.3	Montaje Experimental.....	36
	<i>Mecánico:</i>	36
	<i>Electrónica</i>	38
2.4	Caracterización y Resultados.....	40
2.4.1	Metodología.....	40
2.4.2	Análisis de los pulsos.....	42
2.2.3.	Curva Característica	45
2.4.3	Curva de Conteo vs Voltaje	51
	Conclusiones	54
	Apéndice A: Tabla de datos curva de conteo en función del voltaje.....	58
	Bibliografía	66

Introducción

Los detectores a través de la historia han sido las principales herramientas para explorar y conocer los componentes más pequeños de la materia, imposibles de ser detectados por los sentidos humanos. La forma usual para conocer a profundidad el mundo microscópico es estudiando lo sucedido en una colisión de partículas, mediante la información suministrada por diferentes tipos de detectores. Estos detectores se pueden clasificar en tres tipos: los más próximos al punto de colisión son los detectores de trazas que evidencian la trayectoria y los ángulos de dispersión de las partículas cargadas; los calorímetros, que son externos a los detectores de trazas, se dividen en: calorímetros electromagnéticos y hadrónicos, este tipo de detectores miden la energía de partículas cargadas y neutras; por último, los más lejanos a un punto de colisión son los detectores de muones que identifican este tipo de partículas.

Uno de los más grandes instrumentos El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), es utilizado para conocer todo lo relacionado a la física de partículas con la colaboración de seis experimentos (ATLAS, CMS, ALICE, TOTEM, LHCb y LHCf) caracterizados por sus detectores [1]. Uno de los más grandes experimentos es el CMS destinado a estudiar las colisiones de las partículas al interior del gran acelerador con ayuda de los 3 tipos de detectores descritos anteriormente.

Este trabajo se centra en los detectores gaseosos, específicamente en la cámara proporcional de Multialambres (MWPC), que condujo a nuevas técnicas de detección de partículas y al reconocimiento de Georges Charpak al recibir el

premio Nobel de Física en 1992 por este invento [2]. A diferencia de anteriores detectores como la cámara de burbujas, que registra un par de fotos por segundo, la MWPC puede registrar hasta un millón de trazas por segundo. Este nuevo dispositivo inicio una nueva era para la física de partículas, creando detectores con mayor velocidad y precisión como lo son: drift chamber y time-projection chamber.

La invención de la MWPC abrió el camino a nuevos experimentos de colisión de partículas que permitió: poner a prueba teorías de producción de eventos, encontrar nuevas partículas masivas, descubrimientos de los bosones W y Z en el CERN, el quark charm en el SLAC y Brookhaven y el quark top en el Fermilab. Actualmente este dispositivo se encuentra todavía en uso en el LHC y es un instrumento importante en la investigación en física de altas energías y en la física médica. [3]

Los beneficios y logros que se alcanzaron después de la invención de MWPC, hace de interés diseñar, construir y caracterizar una MWPC, como un acercamiento a la importancia de fabricación de detectores de bajo costo en Colombia y como un paso inicial a la inserción a la Colaboración RD 51 del CERN, que una varios institutos para promover el desarrollo tecnológico de los detectores gaseosos.

Estado del arte

Un detector es un dispositivo de alta precisión usado para rastrear, identificar y detectar el paso de radiación, ángulos de difusión, transferencia de energía e identidad de las partículas a través de ellos, convirtiendo esta información más accesible a nuestros sentidos.

Con el descubrimiento de Bequerel, J.J Thomson, en 1899, se dio a conocer las características y funcionamiento de las cámaras de ionización al explicar que los iones eran atraídos a una placa conductora creando un campo eléctrico a través del aire seco [6]. Madame Sklodowska Curie trabajo este método de ionización para medir la intensidad de los rayos X, utilizando una cámara de ionización con un electrómetro, descubriendo con este método el Polonio. [4]

Unos años después, Rutherford explicó la naturaleza de los rayos alfa, Beta y Gamma, lo cual generó la creación de electroscopios para cada uno de estos rayos, que combinados con la cámara de ionización se lograba medir gases radioactivos. Estos métodos de detección basados en placas fotográficas, electroscopios y cámaras de ionización presentaban una limitación: solo tenían sensibilidad frente a la radiación en masa pero eran insensibles a los rayos por separado. Esta limitación llego a su final con el espintariscopio inventado por Crookes en 1903, dando inicio a las técnicas de detección basadas en el centelleo. [5]

En el año de 1911, C.T.R. Wilson construyó la primera cámara de niebla, que permite observar el camino seguido por las partículas cargadas y fotografiar la traza resultante. Entre 1923 y 1930, la cámara de niebla se fue perfeccionando abriendo camino a importantes descubrimientos. Nueve años después A. Langsdorf construyó la primera cámara de burbujas, donde las trazas de las partículas se visualizan en un medio líquido; este instrumento logró grandes avances en el campo de la física de altas energías. [6]

Rutherford y Geiger describieron y construyeron el primer contador con gas conocido como Geiger Muller en los años treinta.; este instrumento tiene grandes aplicaciones por su simplicidad, facilidad de manejo y bajo precio, pero con un gran defecto, no puede medir directamente la energía de la radiación.[4]

El desarrollo de detectores con gas tomó fuerza en los años cuarenta cuando Frish inventó la cámara de ionización de rejilla con aplicaciones en la espectroscopia alfa, y a finales de esta década apareció el contador proporcional que amplifica la carga en el gas, este invento se aplica en la espectroscopia de rayos X de baja energía [6].

Durante la década de los cincuenta los detectores clásicos gaseosos fueron desapareciendo en trabajos de alta precisión dando lugar a detectores semiconductores. Pero sólo unos años más tarde, entre 1967 y 1968, se desarrolló otro tipo de detector gaseoso, la cámara proporcional de multialambres (MWPC); creada por el Físico Georges Charpak quien recibió el premio nobel de Física en 1992 por el diseño y construcción de esta cámara. La invención de este dispositivo inició una nueva era en el campo de detectores por su gran resolución espacial de unos cientos de micras, con buena localización en dos y tres dimensiones de radiación incidente y excelente resolución energética [7].

Este dispositivo es importante por las aplicaciones en la física de altas energías, física de partículas y en física médica. Algunas de estas aplicaciones son: la difracción de cristales, cromatografía Beta, escáner de radiología digital basada en la MWPC inventado por el grupo BINP Novosibirsk aplicado en hospitales de Rusia y Francia [5], . En la actualidad, se busca el mejoramiento de este dispositivo a partir de una mejor resolución y reducción de dosis.

La MWPC, al ser la primera en iniciar la nueva generación de detectores gaseosos, con implicaciones importantes en experimentos de física de altas energías y física de partículas; se considera en este trabajo como objeto de estudio diseñar, construir con materiales de bajo costo y caracterizar la MWPC, dentro del campo de Altas energías y Física médica, aportando al proyecto de Colciencias del grupo CRYOMAG y a la Colaboración RD 51.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y caracterizar un detector gaseoso de partículas tipo Multialambres.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y construir la Cámara Proporcional de Multialambres

Fabricar un montaje experimental para la caracterización del detector.

Verificar el funcionamiento de MWPC con diversas mezclas de gases.

Caracterizar el detector con diversos voltajes de operación y gases de llenado. Se medirá la curva característica: número de iones colectados en función del Voltaje y la curva: Conteo en función del Voltaje.

1. Marco teórico

1.1 Características generales de los detectores de partículas.

Sensibilidad

Es la capacidad que tiene un detector para producir una señal medible dependiendo del tipo de radiación y de su energía. Esta propiedad determina el tipo de radiación óptima para medir y así saber en qué casos usar el detector y en cuáles no.

Respuesta del detector

Los detectores proveen información de la presencia de radiación y energía de la radiación. Si la radiación es absorbida en el detector, la ionización producida da una medida de la energía [8].

La respuesta del detector es por lo tanto la relación entre la altura del pulso ó la carga total en él y la energía de la radiación.

Resolución energética

Cuando se estudia un detector es muy importante saber si es capaz de diferenciar dos señales de energías diferentes.

La resolución energética se puede definir como:

$$\text{Resolución} = \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

Entre menor sea el valor que se obtenga de esta relación, mejor es la resolución. Si los pulsos del detector son Gaussianos, se expresa a partir de la anchura total a la mitad del máximo de la señal (FWHM), con la relación:

$$\Delta E = FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = 2,35\sigma \quad (2)$$

También se puede analizar la dependencia de la resolución con la energía a nivel experimental por medio de los siguientes parámetros:

w= energía requerida para producir una ionización, esta depende únicamente del material.

J= número de ionizaciones para una energía E.

$$J = \frac{E}{w} \quad (3)$$

Donde las fluctuaciones de J producen pérdida de resolución en la energía dada por el sistema de medición. Si el detector no absorbe totalmente la energía como sucede con los detectores delgados, J es dada por la distribución de Poisson [9]:

$$\text{Resolución} = 2.35 \sqrt{\frac{w}{E}} \quad (4)$$

Si el detector absorbe totalmente la energía de radiación, se observa que R dada por Poisson ya no es válida, sino que R es más pequeña:

$$\text{Resolución} = 2.35 \sqrt{\frac{FW}{E}} \quad (5)$$

Donde F es el factor Fano y es menor de uno para detectores semiconductores y gaseosos.

Eficiencia

La eficiencia de un detector es la capacidad de detectar la radiación proveniente de una fuente [10]. Esta eficiencia se determina a partir de tres tipos:

- **Eficiencia Absoluta:**

La eficiencia absoluta da cuenta de los eventos detectados respecto a las emisiones realizadas por la fuente y se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos}} \quad (6)$$

- **Eficiencia Intrínseca:**

La eficiencia intrínseca relaciona los eventos detectados con respecto a las partículas que ingresan al detector, esta relación depende de las condiciones geométricas del montaje y se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{partículas incidentes}} \quad (7)$$

- **Eficiencia Geométrica:**

La eficiencia Geométrica relaciona el número de partículas emitidas por la fuente radiactiva que ingresan al detector. Es importante resaltar que esta cantidad depende del montaje experimental y se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{partículas en el detector}}{\text{partículas emitidas}} \quad (8)$$

1.2 Física de los detectores gaseosos

Estos detectores constan de un gas encerrado en un recipiente de paredes tan delgadas como sea posible para no interferir con la radiación que llega.

Esta radiación que incide sobre un gas genera ionizaciones, llamadas ionizaciones primarias. Luego las cargas generadas pueden generar ionizaciones secundarias, la suma de estas contribuciones son las cargas que generan la señal generada por el detector.

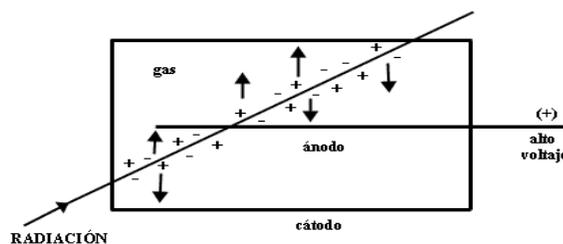


Figura 1-1 Ionización dentro de un gas al incidir radiación en un medio gaseoso.

Los iones positivos y electrones, producidos por la radiación dentro del gas, se dirigen a un par de electrodos que se encuentran a alto voltaje; en otras palabras

los iones positivos serán atraídos hacia el polo negativo del detector (el cátodo), y los electrones libres lo serán hacia el polo positivo (el ánodo) [11].

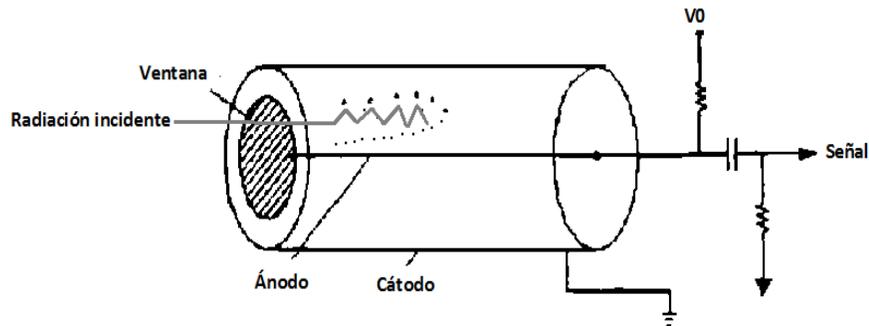


Figura 1-2 Partes principales de un detector gaseoso.

Radiación incidente

El número de iones creados en el gas se puede calcular con la siguiente relación:

$$n_{total} = \frac{\Delta E}{w_i} \quad (9)$$

Donde n_{total} es el número de pares electrón- ión creado, ΔE la pérdida total de energía y w_i la razón de energía perdida y número de iones creados.

Este número de iones también se puede describir por la distribución de Poisson con la siguiente relación:

$$\bar{n} = \frac{L}{\lambda} = LN\sigma_i \quad (10)$$

Donde \bar{n} corresponde al número medio de pares electrón – ión creado, L a la longitud de la trayectoria recorrida en el gas, λ el camino libre medio, N el número

de átomos en la longitud L y por último σ_i la probabilidad por unidad de longitud de producir una ionización en el gas i .

Con estas consideraciones, se tiene que la eficiencia de detección está limitada por este fenómeno con la siguiente relación:

$$\varepsilon_{det} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\bar{n}} \quad (11)$$

De esta relación, se puede determinar que cuanto mayor sea el número de pares iones creados, mayor será la eficiencia de detección.

1.2.1 Difusión de iones y electrones sin campo eléctrico.

Las partículas cargadas pierden su energía rápidamente en colisiones con las demás partículas del gas contribuyendo a la energía térmica del mismo. Si se asume que la energía de las partículas obedece a la distribución de Maxwell:

$$F(\varepsilon) = C\sqrt{\varepsilon}e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} \quad (12)$$

Donde ε es la energía de las cargas, k es la constante de Boltzmann y C es una constante que depende del gas, se puede conocer la distribución energética de las cargas en un gas a partir de la distribución de Maxwell.

En ausencia de otros efectos, una distribución localizada de cargas se difunde por múltiples colisiones obedeciendo la ley de Gauss:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} dx \quad (13)$$

Donde $\frac{dN}{N}$ es la fracción de cargas encontradas en el elemento dx a una distancia x del origen, cuando ha transcurrido un tiempo t ; D es el coeficiente de difusión. La desviación estándar de la distribución lineal y volumétrica está dada por:

$$\sigma_x = \sqrt{2Dt} \quad \text{o} \quad \sigma_V = \sqrt{4Dt} \quad (14)$$

En esta relación, se observa que en cuanto más tiempo transcurra, las cargas en un gas tenderán a separarse unas de otras, este comportamiento se observa en la figura 1-3, donde se representa la distribución espacial de iones producidos en el aire con condiciones normales a diferentes intervalos de tiempo [3].

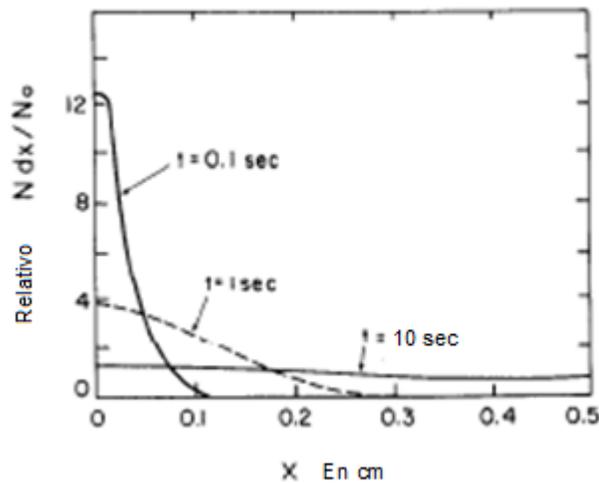


Figura 1-3: Distribución espacial de los iones

Los valores de los diferentes coeficientes de difusión de algunos iones en su propio gas, se ilustra en la Tabla 1. Durante la difusión, los iones colisionan con las moléculas del gas; el camino libre medio, la velocidad media, y el tiempo entre colisiones también se dan en la tabla. Los electrones se mueven más rápido que los iones (debido a su pequeña masa), su velocidad térmica media es de alrededor de 10^7 cm/s, también debido a su tamaño insignificante, su camino libre

medio es clásicamente, cuatro veces más largo que el de los iones en un gas [12].

Tabla 1: Coeficientes de difusión de algunos iones [4]

Gas	λ (cm)	V (cm/s)	D+ (cm ³ /s)	μ^+ (cm ² /sV)
H ₂	1.8×10^{-5}	2×10^5	0.34	13
He	2.8×10^{-5}	1.4×10^5	0.26	10.2
Ar	1×10^{-5}	4.4×10^4	0.04	1.7
O ₂	1×10^{-5}	5×10^4	0.06	2.2
H ₂ O	1×10^{-5}	7.1×10^4	0.02	0.7

1.2.2 Movilidad de iones

Cuando un campo eléctrico es aplicado a lo largo del volumen de gas, se crea un flujo de iones en dirección del campo aplicado, la velocidad media de este movimiento es llamada velocidad de difusión W_+ , y ésta es linealmente proporcional a la reducción del campo E/P , siendo P la presión del gas. Por lo tanto la movilidad se define como:

$$\mu^+ = \frac{w^+}{E} \quad (14)$$

El valor de la movilidad es específico para cada ión en un gas determinado [7]. Un argumento clásico permite obtener la relación entre la movilidad y el coeficiente de difusión:

$$\frac{D^+}{\mu^+} = \frac{KT}{e} \quad (15)$$

La anterior ecuación, muestra la relación entre el campo eléctrico y la temperatura; en cuanto menor sea la temperatura, menor debe ser el campo eléctrico para la recolección de iones.

En la siguiente tabla, se da la movilidad de algunos iones en gases comúnmente usados en las cámaras proporcionales.

Tabla 2: Movilidad de algunos iones en diferentes gases

GAS	Iones	Movilidad (cm ² /segV)
Ar	CH ₄ ⁺	1.87
CH ₄	CH ₄ ⁺	2.26
Ar	CO ₂ ⁺	1.72
CO ₂	CO ₂ ⁺	1.09

En la mezcla de gases C₁, C₂,, C_n, la movilidad μ_i^+ de un ión G_i^+ es dado por la relación:

$$\frac{1}{\mu_i^+} = \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij}}{\mu_{ij}^+} \quad (16)$$

Donde P_j es la concentración de volumen de gas j del ión, y μ_{ij}^+ la movilidad del ión G_i^+ en un gas G_j . En una mezcla de gases, el proceso de transferencia de carga toma lugar, y todos los iones se mueven muy rápidamente exceptuando algunos con bajo potencial de ionización.

1.2.3 Difusión de electrones.

Las partículas de alta energía pierden la mayor parte de la misma en interacciones electromagnéticas con los átomos y moléculas del medio que atraviesan. Gran parte de estas interacciones producen ionizaciones primarias, liberando electrones y fotones que pueden producir a su vez nuevas ionizaciones.

Dentro de un campo eléctrico los electrones se difunden siguiendo una distribución Gaussiana como se ilustró en la ecuación (13), el cambio en la distribución de energía en función del campo eléctrico, resulta en un coeficiente de difusión dependiente del campo eléctrico E . Existe un límite térmico, que corresponde a un gas ficticio, donde la energía de los electrones no se incrementa con la presencia de un campo eléctrico; un ejemplo de este gas es el dióxido de carbono, debido a su baja energía, que está muy cerca al límite térmico. Para una mezcla de gases de 75% de argón y 25% de Isobutano, se obtiene un acercamiento a este límite en una cámara proporcional [13].

Este límite depende de la desviación estándar del número de difusión de electrones en un campo eléctrico. Por ejemplo si el tiempo promedio de difusión de electrones (n) es medida, el límite se puede representar con la relación (17), que muestra esta dependencia, considerando K electrones:

$$\sigma_K^2 = \frac{\sigma_x^2}{2 \ln n} \sum_{i=k}^n \frac{1}{i^2} \quad (17)$$

Para $k=1$, la expresión se reduce:

$$\sigma_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{3 \ln n}} \sigma_x \quad (18)$$

Por ejemplo, para $n=100$, un valor típico para 1 cm de deriva a una atmósfera de presión del gas es $\sigma_1 = 0.4 \sigma_x$.

1.2.4 Producción de pares.

La producción de pares electrón - positrón puede ocurrir en energías de fotones por encima del umbral de 1,02 MeV (correspondiente a dos masas de electrones); La Figura 1-4 (izquierda) muestra el coeficiente de absorción debido a la producción de pares en varios elementos. La Figura 1-4 (derecha) da la energía relativa entre e^- y e^+ . En esta figura, el eje de ordenadas es una cantidad proporcional a la sección eficaz para el proceso, aumentando con la energía del fotón (dada en términos de la masa en reposo del electrón). Debido al valor muy pequeño del coeficiente de absorción, la cámara proporcional se utiliza en esta región de energía sólo para detectar los pares producidos en una capa de material pesado colocado delante de la cámara. Los contadores Shower son la construcción de esta forma intercalando las cámaras con placas de conversión, o mediante el uso de cámaras de alta densidad como la cámara de difusión con celdas de conversión de materiales pesados en el volumen de gas. [3]

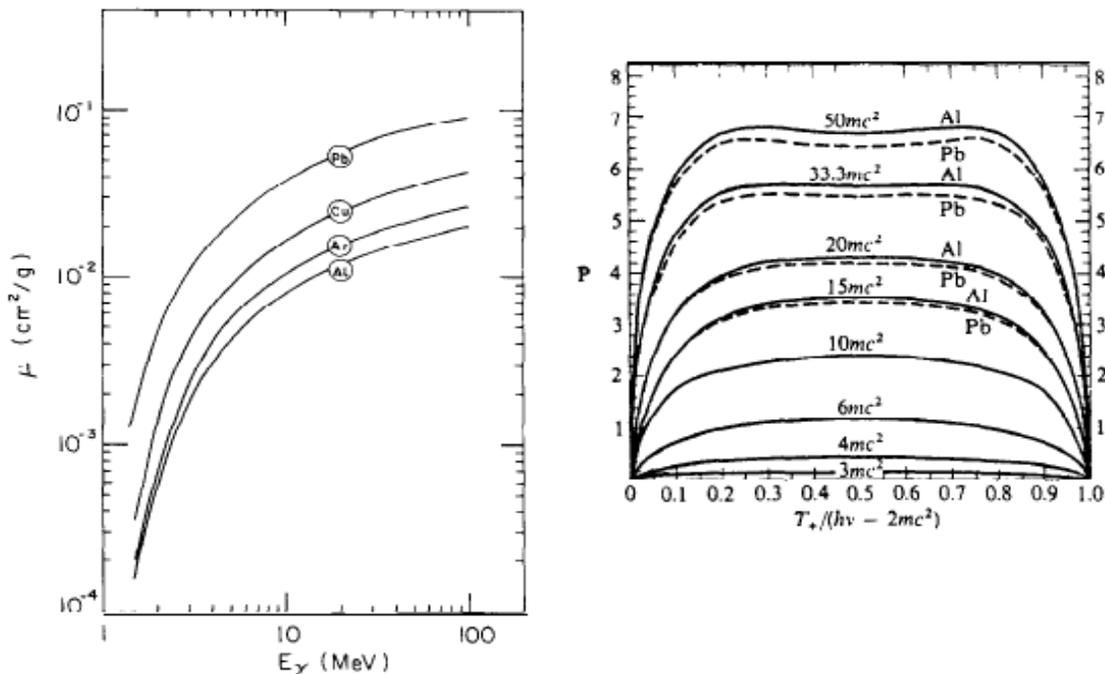


Figura 1-4 Coeficiente de absorción en la producción de pares para distintos materiales: En la figura de la izquierda, el coeficiente de absorción para $e^+ e^-$ en la producción de pares de

diferentes materiales. En la figura de la derecha, es la energía relativa entre e^+ y e^- en producción de pares. [3]

1.2.5 Fenómeno de sofocación (Quencher)

La gran cantidad de estados excitados no radiactivos de las moléculas de los gases orgánicos, permite la absorción de fotones en un gran rango de energía. Para el metano, por ejemplo, la absorción es bastante eficiente, porque cubre el rango de energía de los fotones emitidos por el Argón durante el proceso de desexcitación. Está es una propiedad común de muchos gases orgánicos, como las familias de hidrocarburos y alcoholes, así como algunos compuestos inorgánicos como freones, en donde las moléculas disipan energía por colisiones elásticas o por disociación en radicales simples [14].

La absorción de los fotones emitidos en el interior del gas es primordial puesto que dichos fotones pueden realizar efecto fotoeléctrico con las paredes del detector, el ánodo o cátodo, y arrancar electrones, generando nuevas cascadas que alterarían la señal. Como solución de este problema se utiliza un gas poliatómico.

1.3 Muones Cósmicos

En el año de 1929 el científico ruso Skobeltzyn, con ayuda de una cámara de niebla observó la presencia de partículas de alta energía, las cuales identificó como rayos gamma cósmicos; en ese mismo año, los científicos Bothe y Kolhoerster demostraron con detectores Geiger que en realidad estas partículas provenían de radiaciones penetrantes de origen cósmico. [7]

En 1938, P. Auger encontró coincidencias, utilizando contadores Geiger separados uno del otro a una distancia de 150 m. Este hecho, lo explico con la formación de cascadas iniciadas por rayos gamma a una altura atmosférica, pero no logró explicar que se observaba en la superficie terrestre.

Utilizando la técnica de emulsiones nucleares, el físico Cecil Frank Powell y su grupo, descubrieron en el año de 1947, dos tipos de partículas: el Pión sensible a la interacción nuclear y el Muón una partícula inestable, alcanzando profundidades de cientos de metros bajo tierra, dejando un rastro de ionización detectable. Este descubrimiento logró explicar la formación de cascadas a partir de rayos cósmicos primarios que entran a la atmósfera.

La cascada inicia en el momento en que un núcleo primario colisiona con un núcleo atmosférico (Nitrógeno u Oxígeno) creando nuevas partículas (ver figura 1-5). Las partículas que se generan inicialmente son piones, los cuales colisionan con otro núcleo atmosférico o se desintegran en un muón y en un neutrino [15].

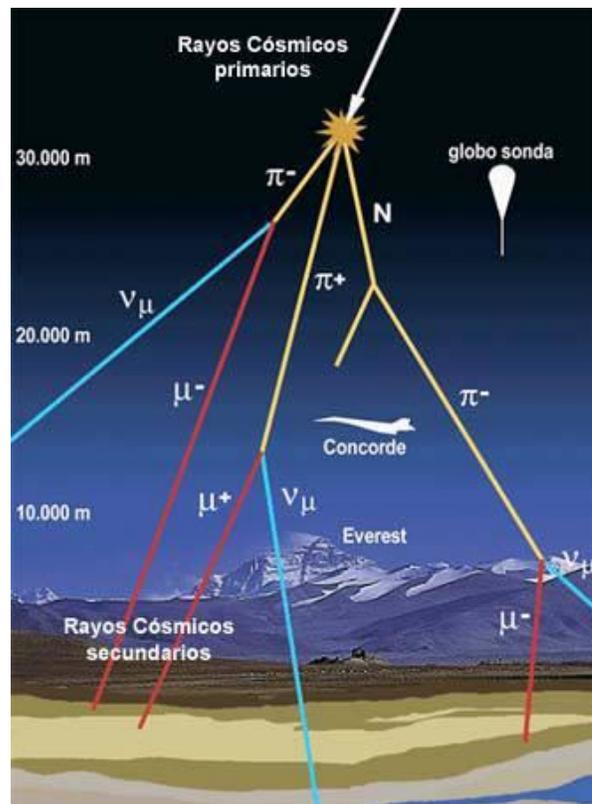


Figura 1-5 Cascada de rayos cósmicos: Un rayo cósmico primario penetra la atmósfera terrestre, generando una cascada de partículas, de las cuales el muon alcanza la superficie de la Tierra [10].

Los muones, tienen una vida media muy corta de $2\mu s$, pero con un alto nivel de penetrabilidad. Los muones, de todas las partículas creadas en una cascada de rayos cósmicos, los que alcanzan la superficie de la tierra, al viajar a velocidades cercanas de la luz. [16]

El flujo de muones a nivel del mar es de $\frac{1 \text{ muón}}{\text{cm}^2 \times \text{min}}$, incluyendo muones positivos y negativos, donde los más abundantes son los muones negativos. Este flujo de muones decrece exponencialmente y presenta una pequeña variación para ángulos polares inferiores a 45 grados.

Los muones disipan la energía principalmente a través de interacciones con los electrones en el medio, generando así una señal eléctrica medible cuando pasa a través de un electrodo. Por esta razón, las Cámaras proporcionales de Multialambres (MWPC) son las más adecuadas y utilizadas en los experimentos para la detección de muones cósmicos [17].

1.4 Curva característica de respuesta.

Los detectores gaseosos son usualmente clasificados en tres regiones dependiendo de la magnitud del voltaje aplicado al detector: cámara de ionización, contador proporcional y contador Geiger Muller.

La siguiente gráfica muestra las regiones de operación para un detector gaseoso, conocida como “curva característica”. Esta representa el número de iones colectados en los electrodos en función del voltaje aplicado.

Cómo se observa, la curva está dividida en cinco zonas de la siguiente manera:

- **Zona de recombinación (I):** en esta región 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.
- **Zona cámara de ionización (II):** En esta región el número de iones colectados no cambia si se aumenta el voltaje. Se recogen en los electrodos esencialmente todos los iones primarios; es decir, no hay ni recombinación ni ionización secundaria. Por esta razón, el tamaño del pulso depende de la ionización primaria y, por lo tanto, de la energía depositada por cada partícula detectada.

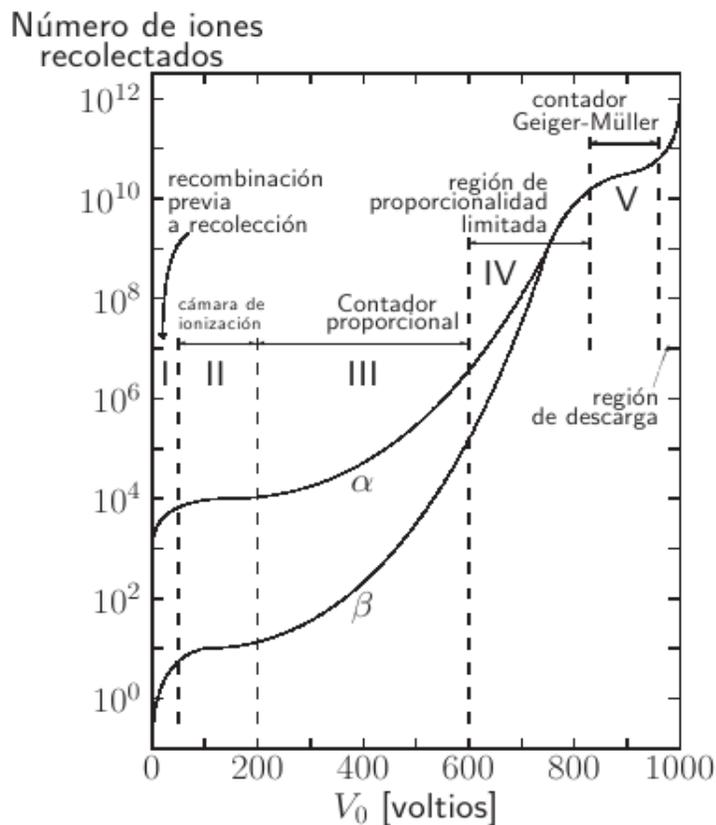


Figura 1-6: Variación del número de iones con el voltaje, que representan las zonas de funcionamiento de un detector gaseoso [2].

La cámara de ionización se utiliza para medir la energía de la radiación, además de indicar su presencia. En general, la corriente generada en estas cámaras es tan pequeña que se requiere de un amplificador muy sensible para medirla.

- **Zona de Contador Proporcional (III):** la carga colectada aumenta al incrementarse el voltaje. Esto se debe a que los iones iniciales (primarios) se aceleran dentro del campo eléctrico logrando, a su vez, crear nuevos pares de iones. Si aumenta el voltaje, la ionización secundaria da lugar a un efecto de multiplicación. Los pulsos producidos son mayores que en la región anterior, pero se conserva la dependencia en la energía de las radiaciones.
- **Zona de Proporcionalidad Limitada:** Cuando se aumenta el campo la proporcionalidad se pierde como consecuencia de distorsiones del campo eléctrico debido a grandes acumulaciones de carga cercanas al ánodo.
- **Zona Geiger Muller:** 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. A estos valores de voltaje es necesario un gas de apagado para absorber los fotones generados por las cargas aceleradas.

1.5 Selección del gas de llenado

Debido al funcionamiento de un detector gaseoso cualquier gas puede ser empleado como gas de llenado, pero dicha escogencia debe hacerse dependiendo de varios parámetros limitantes como: bajo voltaje de operación, alta ganancia, buena proporcionalidad, altas tasas de capacidad, largo tiempo de vida media y rápida recuperación, entre otros [18].

Como consecuencia de los múltiples modos de disipación de energía de las moléculas poliatómicas, se tiene que en los gases nobles el fenómeno de avalancha y multiplicación ocurre a voltajes mucho más bajos. De este modo es recomendable usar un gas noble como gas primario, que al mezclar con un gas poliatómico, se obtengan voltajes de operación más altos, buena absorción de fotones y mayor cantidad de carga colectada. En la Tabla 3, se ilustra algunas características de los gases más utilizados en los detectores gaseosos.

Tabla 3: Características de algunos gases comúnmente utilizados en detectores gaseosos.

Gas	Potencial de Ionización [eV]	Energía media /pares electrón-ión 'W' [eV]	Perdida de energía [keV/cm]	Número de pares electrón – ión [cm^{-1}]	Número de electrones primarios [cm^{-1}]
Ar	15.7	25.0	2.53	106	25
Xe	12.1	22	6.87	312	41
He	24.5	41.6	0.345	8.3	5
H ₂	15.6	36.4	0.32	8.8	5.2
N ₂	15.5	34.8	1.96	56.3	10
Air		33.8	2.02	59.8	
O ₂	12.5	30.2	2.26	74.8	22
CH ₄	12.6	30	1.61	54	37
C ₂ H ₆	11.5	26	2.91	112	48
Isobutano/i-C ₄ H ₁₀	10.6	26	5.67	220	90
CO ₂	13.8	34	3.35	100	35

1.6 Cámara proporcional Multialambres

Los contadores proporcionales han sido y son ampliamente utilizados cada vez que sea necesario medir la pérdida de energía de radiación. La capacidad de localización espacial de un contador es baja, limitan la determinación de que una partícula haya o no haya atravesado el detector. El apilamiento de muchos contadores independientes es posible, pero no es muy atractivo mecánicamente. Existió la vaga creencia de que las estructuras multipolares en el mismo volumen de gas no iban a funcionar muy bien entre los alambres, ya que cualquier intento de localización en la estructura era frustrante [3]. Fue Charpack, quien construyó

la cámara proporcional de Multialambres en 1967-68, la cual consiste de un conjunto de alambres como ánodos muy próximos entre sí, todos al mismo potencial. Cada alambre actúa como un contador independiente.

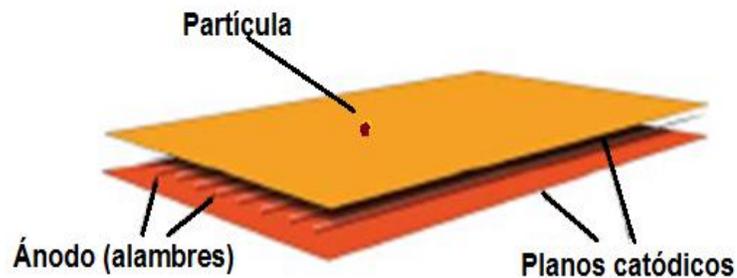


Figura 1-7 Esquema de una cámara proporcional de multialambres (MWPC). El cátodo se conecta a tierra y el ánodo (que en este caso son los alambres) se conecta a un alto voltaje positivo. Si una partícula cruza perpendicularmente el plano del detector, se genera una señal.

La MWPC se compone esencialmente de un conjunto de alambres (ánodos) finos, paralelos y separados por igual, simétricamente colocados entre dos planos catódicos, como se observa en la figura 1-7. Para un correcto funcionamiento, la distancia entre los alambres y el cátodo " l " es normalmente tres o cuatro veces mayor que el espacio entre alambres S .

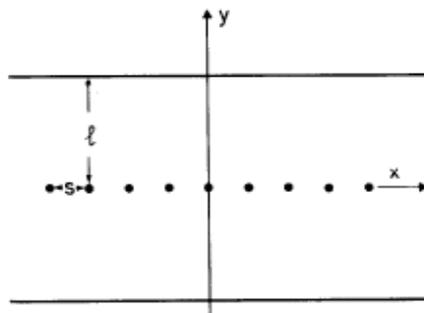


Figura 1-8: Sección eficaz del plano anódico

Cuando se aplica un potencial negativo a los cátodos con los ánodos conectados a tierra, las líneas equipotenciales se comportan como se ilustra en la figura 1-9. Las cargas que se liberan en el volumen de gas por un evento ionizante, como en un contador proporcional, se dan las condiciones de tal forma que los electrones se desplazarán a lo largo de las líneas de campo hasta alcanzar la región de mayor potencial, muy cerca de los alambres, donde se produce la multiplicación de avalancha [2].

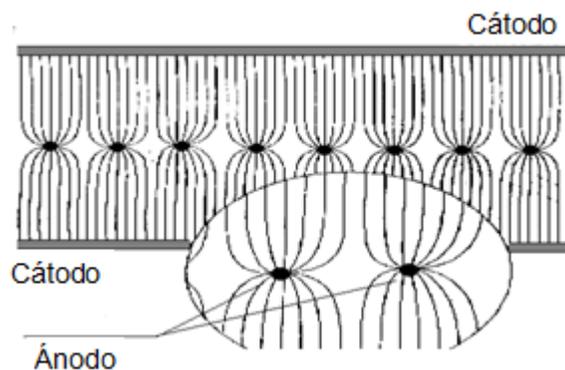


Figura 1-9 Campo eléctrico en una MWPC. [3]

Las avalanchas que se producen muy cerca al ánodo, se asemejan a gotas con un frente ancho de electrones y una larga cola que se va estrechando, formada por una nube de iones que se desplazan lentamente hacia el cátodo, como se ilustra en la figura 1-10.

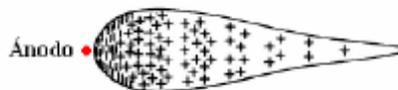


Figura 1-10 Avalancha de los electrones en cercanía al ánodo.[16]

Los electrones que buscan el ánodo, tardan más o menos un tiempo de 1 ns; el proceso de formación de una avalancha cerca al alambre, se representa en la figura 1-11.

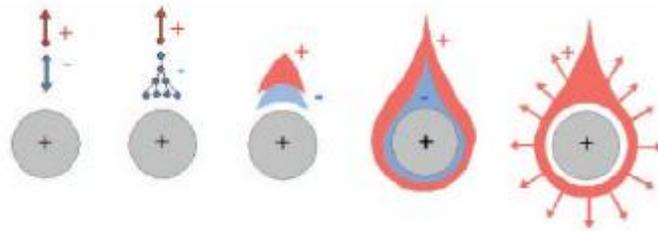


Figura 1-11 Esquema de formación de una avalancha cerca al ánodo. [4]

Esta avalancha, por lo tanto, depende fuertemente de la intensidad del campo eléctrico cerca del ánodo. La figura 1-11 muestra la variación del campo eléctrico en dirección perpendicular al plano del alambre [19].

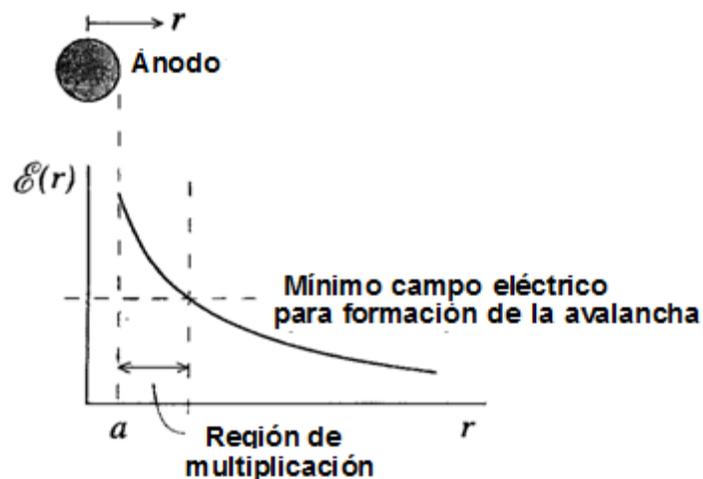


Figura 1-12: Variación del Campo eléctrico en función del radio del alambre. [2]

La expresión analítica para el campo eléctrico se puede deducir mediante algunos algoritmos de electrostática. Una expresión aproximada ha sido dada por Erskine, quien también calculó las deformaciones de campo.

Teniendo en cuenta la figura 1-12 y $V(a) = V_0$, $V(l) = 0$, se tiene:

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2\pi l}{s} - \ln \left[4 \left(\text{sen}^2 \frac{\pi x}{s} + \text{senh}^2 \frac{\pi y}{s} \right) \right] \right\} \quad (19)$$

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon_0 s} \left(1 + \text{tg}^2 \frac{\pi x}{s} + \text{tgh}^2 \frac{\pi y}{s} \right)^{1/2} \left(\text{tg}^2 \frac{\pi x}{s} + \text{tgh}^2 \frac{\pi y}{s} \right)^{-1/2} \quad (20)$$

Y la capacitancia por unidad de longitud está dada por:

$$C = \frac{2\mu\epsilon_0}{(\pi l/s) - \ln(2\pi a/s)} \quad (21)$$

Donde a es el radio del alambre.

1.6.1 Modo de operación de Streamer

Al utilizar alambres gruesos entre 50 μm y 100 μm de diámetro, espaciados a 10 mm, o una mezcla con mayor gas poliatómico como por ejemplo 60% argón y 40% de Isobutano, permite evitar una descarga Geiger, en una cámara proporcional de multialambres (MWPC). Este modo de operación, se conoce como modo de operación Streamer.

Los alambres gruesos, espaciados, a un alto voltaje y con una cierta cantidad de gas Quencher, puede ser una buena opción al presentar grandes señales sin necesidad de un preamplificador, pero con una gran limitación al no eliminar los iones positivos que se encuentran en el ánodo y presentar tiempos muertos largos reduciendo la capacidad del detector [3].

Por otro lado, desaparece por completo el modo proporcional, observándose únicamente el modo streamer, en el cual la carga colectada no depende de la ionización primaria, sino también de fotones producidos por efecto fotoeléctrico, los cuales originan otras avalanchas [7].

La figura 1-13, demuestra las diferentes descargas en un contador proporcional, en un contador Geiger y en un tubo streamer, con la mezcla 60% Argon y 40% Isobutano.

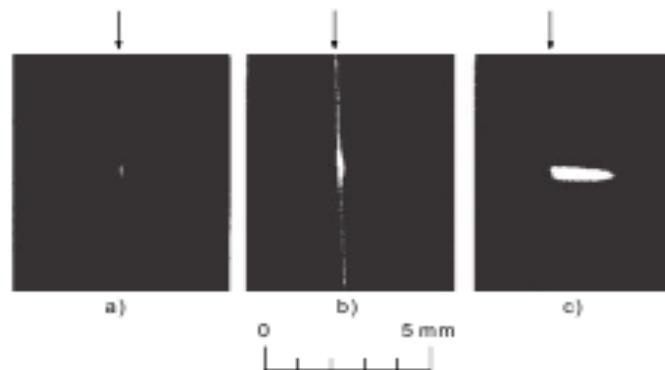


Figura 1-13: Imagen de la descarga producida en un detector gaseoso: a) en una cámara proporcional, b) Contador Geiger y c) Un tubo Streamer. La flecha indica la posición del alambre. [7]

2. Experimento

2.1 Diseño del detector:

Los parámetros geométricos del detector se determinaron con base en algunos datos experimentales encontrados en el artículo de R. Alfaro [12] y el documento de Sauli, Yellow Report [2]. Se planteó como paso inicial la elección del diámetro del alambre, el número de alambres y el espaciamiento entre ellos. La elección se basó en el análisis de las ecuaciones [18], [19] y [20] del capítulo anterior. Se concluyó que a medida que el diámetro del alambre y la separación entre ellos sea menor a 5 μm y a 1mm, respectivamente, se dificulta el funcionamiento de la cámara al trabajar con dimensiones tan pequeñas, presentando limitaciones mecánicas y mayor complejidad en la adquisición electrónica, no garantizando así la reducción de costos.

Las dimensiones más frecuentemente usadas para este tipo de detector son: radio del alambre de 20 a 25 μm , del cual se eligió 25 μm por su costo y menor fragilidad al momento de soldar. El espaciamiento recomendado está entre 2 mm a 5 mm. Se eligió 5mm para facilitar los puntos de soldadura de los alambres en la baquelita. La longitud del alambre se eligió de 50 mm, teniendo en cuenta las dimensiones y geometría del detector. Por último se eligió como material del alambre, tungsteno recubierto en oro, por ser un buen conductor eléctrico, resistente al bombardeo de partículas gammas y neutrones [5] y su recubrimiento en oro impide la oxidación del alambre.

2.1.1 Diseño eléctrico.

El diámetro, el material y el espaciado de los alambres, no son los únicos parámetros que garantizan un buen funcionamiento de la cámara. El diseño del circuito eléctrico, es fundamental para el buen funcionamiento, por lo cual es importante elegir correctamente el valor óptimo de las resistencias y los condensadores.

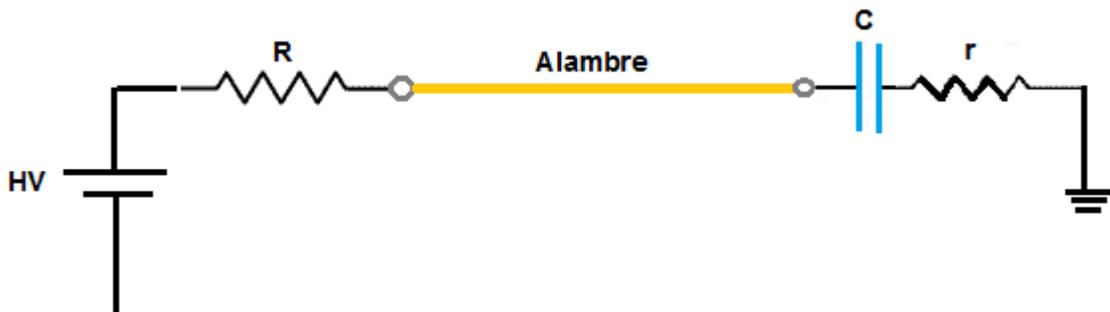


Figura 2-1: Circuito eléctrico del detector: conformado por 12 alambres anódicos, conectados cada uno a una resistencia (r) y un condensador (c). El alto voltaje se conecta a una resistencia (R) del orden de $M\Omega$ para controlar la corriente en el circuito y la salida de la señal se conecta entre la línea del condensador y la resistencia r .

Este circuito consta de una resistencia R de $1,5 M\Omega$, conectada a la fuente de alto voltaje, para limitar la corriente en el circuito. Cada alambre está conectado a un condensador C , para que la señal producida sea desacoplada del alto voltaje y enviada a los módulos de electrónica. Las resistencias r , son del orden de 50Ω a fin de lograr el ajuste de la impedancia con la entrada de los módulos electrónicos.

Una vez determinados los valores de los elementos del circuito eléctrico, se diseñó el circuito en el programa EAGLE 6.1.0.

2.2 Construcción del detector.

Los materiales utilizados para la construcción del detector fueron:

- 12 Alambres de Tungsteno recubiertos en oro (25 μm de diámetro y 50 mm de largo)
- Baquelita cubierta de cobre para el cátodo de 100 mm X 100 mm
- Baquelita de 100 mm X 100 mm con una ventana de 65mm X 35 mm
- 1 resistencia de 1,5 M Ω
- 12 resistencias de 50 Ω
- 12 condensadores cerámicos de 220 pF
- Caja de Acrílico de 20 cm X 20 cm X 5 cm con 5mm de espesor.
- Conector Lemo para la salida de la señal.
- Conector de alto voltaje HV
- 2 racores de 6 mm de acople rápido para flujo del gas.
- Tubo plástico de 6 mm para conexiones de gas.
- Racor tres entradas para mezcla del gas
- Flujometro DWYER escala: 0 - 0.5 l/min
- Flujometro Vogtlin escala: 0 – 10 N l/h

El proceso de construcción, se inicio con el circuito eléctrico. Este circuito está conformado por una baquelita de 100 mm \times 100mm \times 1 mm , con una ventana de 65 mm X 35 mm. Sobre la ventana fueron soldados los 12 alambres de tungsteno recubiertos con oro. Estos fueron tensionados con una masa de 90 gramos durante el proceso de soldado; se dejó una separación entre ellos de 5 mm (ver figura 2-2). A los alambres, se soldaron 12 resistencias de 50 Ω y 12 condensadores de 220 pF. Se conecto una resistencia de 1,5 M Ω a alto voltaje,

para controlar la corriente, teniendo en cuenta la magnitud del voltaje necesario para operar la cámara.

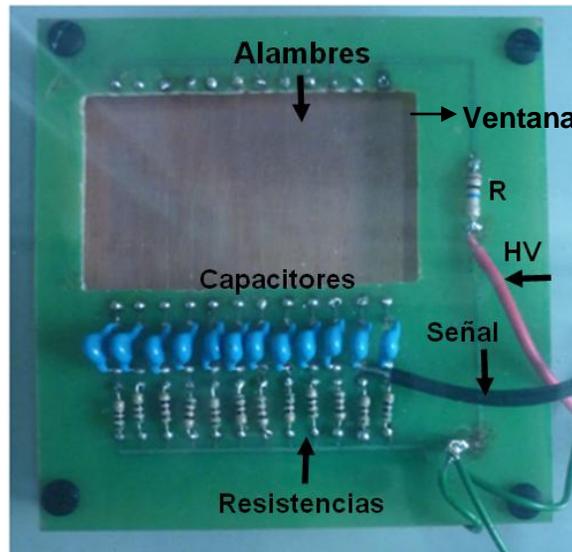


Figura 2-2: Circuito eléctrico de la MWPC, conformado por 12 alambres conectados cada uno a la línea de alto voltaje mediante una resistencia y un capacitor del cual se obtiene una sola la señal, dado que los alambres se encuentran conectados entre sí. La línea de alto voltaje tiene una resistencia de 1,5 M Ω en serie, para controlar la corriente en el circuito. El cátodo es una placa inferior cobrizada, conectada a tierra.

El cátodo del circuito consiste en una baquelita cubierta en cobre, de las mismas dimensiones del ánodo, la cual se coloca debajo de éste. Se realiza una perforación en cada esquina del ánodo y el cátodo, y se ensamblan con tornillos de plástico, fijándolos a una distancia de 4mm utilizando separadores de teflón. Se conecta el cátodo a tierra soldando un cable coaxial en uno de los condensadores para la señal de salida.

2.2.1 Caja del detector.

Se construyó una caja hermética para instalar el detector, dentro de una atmósfera gaseosa, en acrílico transparente. Se eligió este material por sus

propiedades: no se oxida, no se deteriora cuando está expuesto a largos periodos con gases, resistente, sirve como aislante eléctrico y facilita observar las partes internas del detector.

Las dimensiones externas de la caja son de $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$, con una tapa de $200 \times 200 \times 5 \text{ mm}^3$; el grosor de la tapa es más delgado que las paredes, a fin de permitir el paso de la radiación. En el borde de la caja se colocó un O-ring de 3 mm de diámetro con 18 tornillos bristol igualmente espaciados para hacerla más hermética.

En dos caras opuestas de la caja se colocaron dos racores de 6 mm de diámetro, uno para la entrada de gas y el otro para la salida. En las otras caras de las paredes de la caja se instalaron los conectores de alto voltaje y la salida de la señal, como se muestra en la figura 2-3.

Por último se fijó el circuito dentro de la caja, atornillado a unos soportes. Antes del sellado de la caja, se realizaron las pruebas eléctricas del circuito y posteriormente se probó la hermeticidad de la caja.

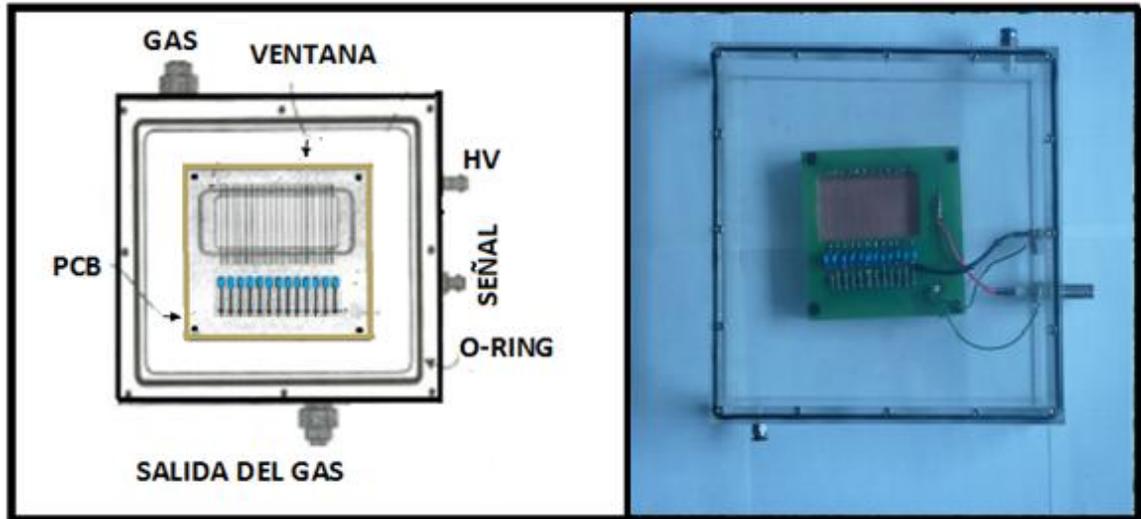


Figura 2-3: Representación esquemática e imagen real de la cámara proporcional de Múltialambres (MWPC). Las paredes de la caja de acrílico, se adecuan con dos racores de acople rápido, para la entrada y la salida del gas. En otra de las paredes de la caja se instala un conector de Alto voltaje y otro para la señal proveniente de los alambres.

2.2.2 Elección del gas de llenado:

El gas más utilizado en los detectores gaseosos es el Argón, por ser un gas noble, de fácil ionización y bajo costo.

También, se utilizo Aire, teniendo en cuenta la descripción citada en la referencia [2], donde se afirma que el aire sirve como gas en el modo de operación proporcional, aunque se generen pequeñas pero detectables avalanchas cerca al ánodo.

Como gas de sofocamiento, se eligió el Metano, por ser el que mejor cubre el rango de energía de los fotones emitidos por el Argón, como se documenta en varios experimentos [3].

Otro gas usado fue la mezcla 90% Ar + 10% CH₄, más conocida como P-10. Esta es la mezcla más utilizada [2] [10], para las cámaras proporcionales, por la gran cantidad de avalanchas generadas cerca al ánodo y por tener el mayor rango de voltaje de operación.

2.3 Montaje Experimental.

El montaje consta de un rack de instrumentos, un soporte para el detector, el sistema para el flujo de gas, módulos de procesamiento de pulsos del estándar NIM, fuentes de alto voltaje, y un osciloscopio. A continuación se describe detalladamente las partes mecánica y electrónica del montaje.

Mecánico:

La parte mecánica 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, un cilindro de Argón y otro de Metano. En la figura 2-4, se puede observar la parte mecánica utilizada para todas las pruebas realizadas al detector.

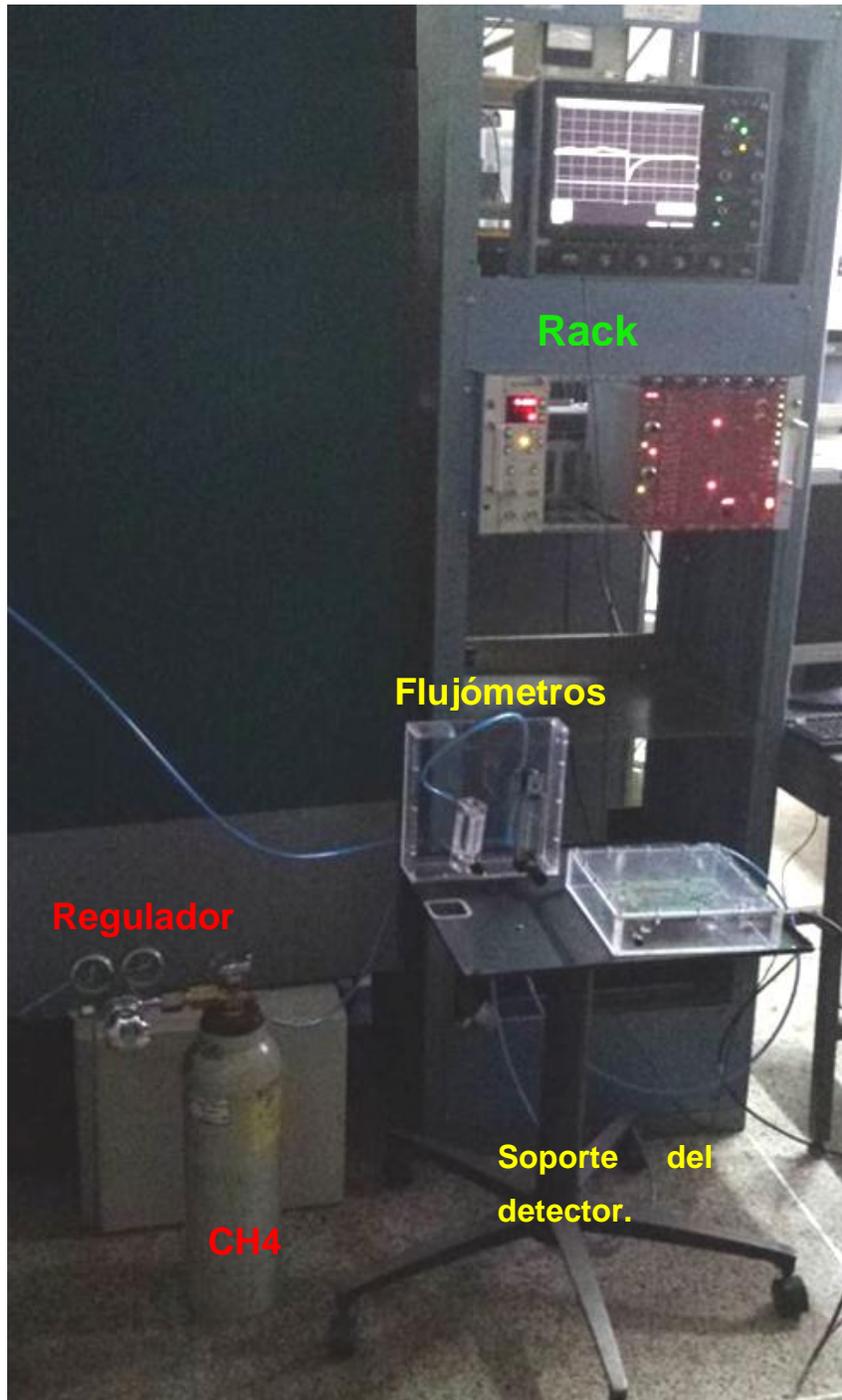


Figura 2-4: Parte mecánica conformada por un rack, un soporte del detector y un sistema de gas de llenado.

Electrónica

La electrónica utilizada para el procesamiento de señales incluye varios módulos del estándar NIM (Nuclear Instrument Module), comúnmente utilizado para experimentos de física nuclear y altas energías. Los módulos utilizados incluyen amplificadores, contadores, discriminadores, convertidor analógico-digital, y analizador multicanal. También se utilizó un osciloscopio digital de alta velocidad y dos fuentes duales de alto voltaje. A continuación se presenta una descripción detallada de todos los instrumentos usados.

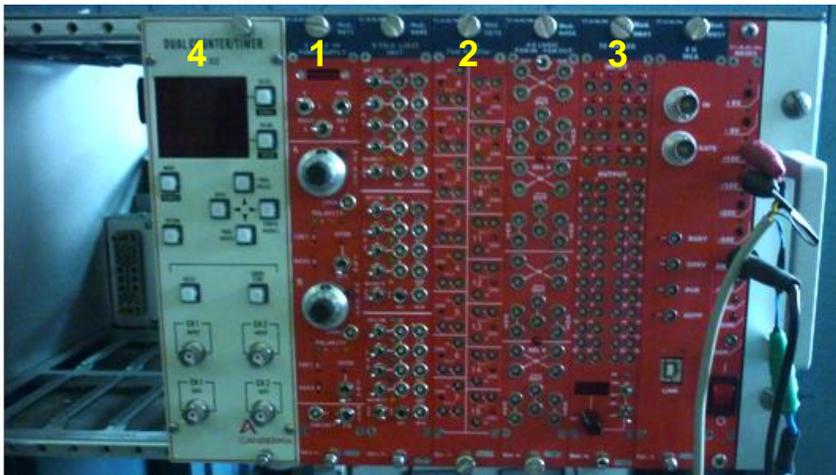


Figura 2-5: Módulos NIM utilizados para la caracterización de la MWPC: 1. Fuente de alto voltaje, 2. Amplificador, 3. Discriminador y 4. Contador.

1. **Fuente de alto voltaje: Ortec modelo 556**, libre de ruido, 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. **Amplificador: CAEN modelo N979**, contiene 16 canales. Cada canal cuenta con una ganancia fija de 10. Tiene una impedancia de salida 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.

3. **Discriminador: CAEN modelo N841**, cuenta con 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 -1 mV a -255 mV . 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 a un cierto nivel de umbral, entre ellos el ruido electrónico.
4. **Contador: Camberra**, Es la unidad que cuenta el número de pulsos que recibe durante distintos lapsos de tiempo.
5. **Preamplificador: CAEN modelo A 1422**, Cuenta con 8 canales de salida. Su principal función es acoplar la impedancia del detector a la del amplificador.
6. **Osciloscopio: LeCroy X-Stream Software**, Digital, con pantalla touch, cuenta con 4 canales, con alta resolución, 50Ω de impedancia y un ancho de banda de 15 MHz.

Otros equipos electrónicos utilizados en los montajes experimentales, son descritos brevemente en la tabla 4.

Tabla 4: Descripción general de las unidades electrónicas utilizadas en la caracterización de la MWPC.

Equipo	Marca	Referencia	Descripción
Procesador De pulsos analógico.	CAEN	N 914	Procesa señales generadas por fotomultiplicadores.
Amplificador	CAEN	N979	16 Canales, con 50 Ω de impedancia.
Discriminador	CAEN	N 841	16 Canales.
Unidad lógica Fan in Fan out	CAEN	N 454	4 secciones independientes con 4 entradas cada uno.
Preamplificador	CAEN	A 1422	8 Canales
Contador	Camberra	512	Dual, Alta resolución
Osciloscopio	LeCroy	X-Stream Software	Digital, 15 MHz
Fuente de alto voltaje	Ortec	556H	3 Kv

2.4 Caracterización y Resultados.

2.4.1 Metodología

Se comprobó el funcionamiento de la MWPC, tomando una sola señal de los 12 alambres, los cuales se hallan conectados entre sí.

La MWPC fue operada con un flujo constante de gas. Antes de iniciar las mediciones, se dejó fluir el gas aproximadamente por unos 10 minutos, a presión atmosférica, para eliminar el aire contenido en la caja.

Se aumentó gradualmente el voltaje hasta comenzar a obtener pulsos en el osciloscopio. Se incremento en algunos casos, de 50 en 50 V y en otros de 100 en 100 V. Se determinó el rango de voltaje en el que funciona el detector sin

presencia de chispas. El rango de voltaje de operación depende de la mezcla de gases y la temperatura ambiente.

El proceso de medida se realizó con la configuración del circuito ilustrada en la figura 2-6, donde la instrumentación cambia según el tipo de caracterización. Se inició el proceso de medida, registrando la amplitud del pulso obtenido directamente del detector, promediado a 100 muestras en el osciloscopio, para cada voltaje. Se calculó el número de iones colectados en función del voltaje, obteniendo la curva característica del detector. Se realizó el conteo de muones en función del voltaje, obteniendo así la curva de Plateau.

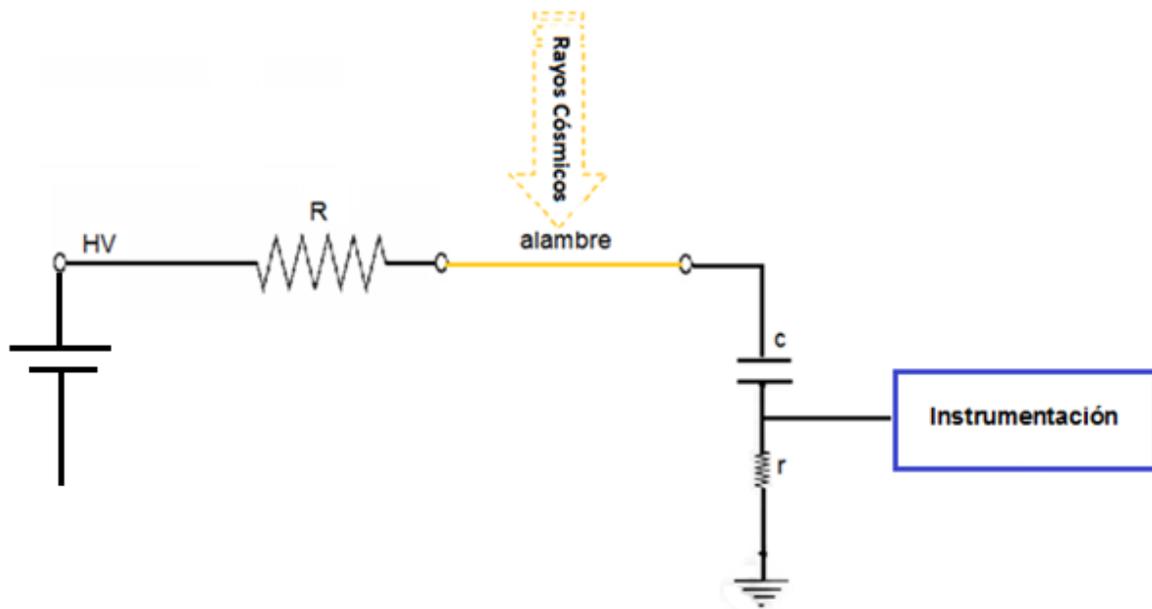


Figura 2-6 Configuración del circuito: Consta del circuito interno del detector y de la instrumentación utilizada para el procesamiento de señales.

Se realizaron varias pruebas con cada tipo de gas: 100% aire, 100% Argón (Ar), 100% metano (CH₄), y la mezcla P10 (90% Ar + 10% CH₄), con el fin de caracterizar la respuesta del detector.

A continuación se describe en detalle cada uno de los procedimientos realizados y los resultados de: Análisis de Pulsos, Curva Característica, y Curva de Plateau.

2.4.2 Análisis de los pulsos

En este proceso, se analizaron los pulsos obtenidos directamente en el osciloscopio en la configuración mostrada en la figura 2-7.

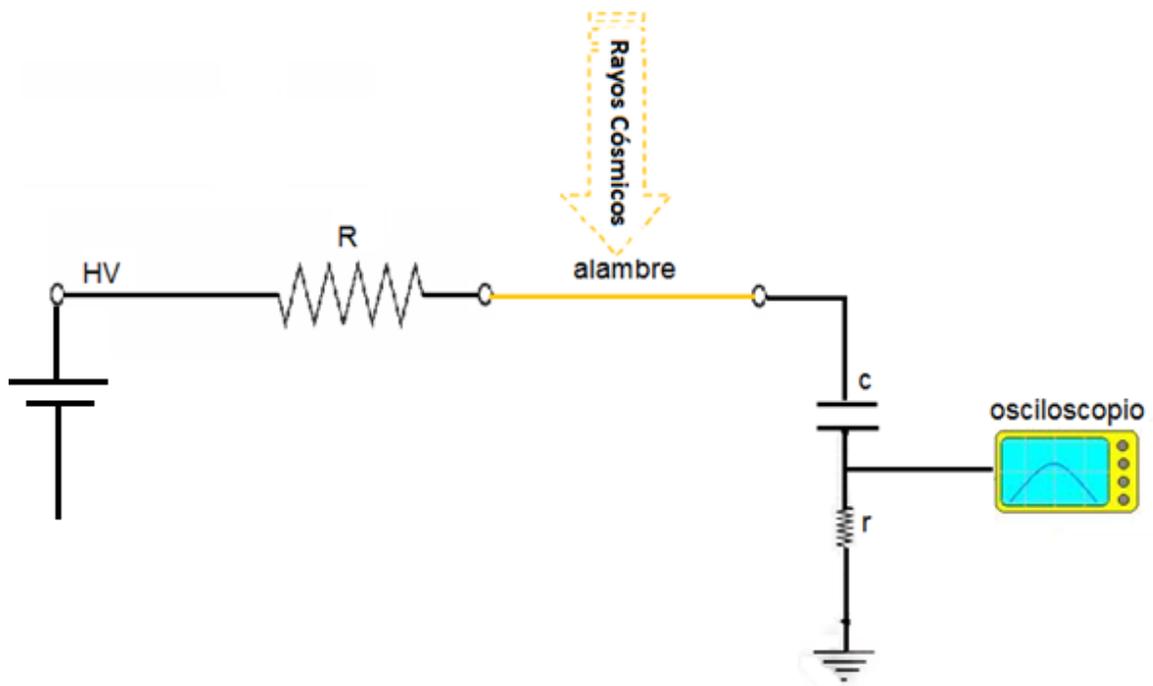


Figura 2-7 Configuración del circuito, con un osciloscopio.

Los pulsos obtenidos son de polaridad negativa, como se ilustra en la figura 2-8. Al aumentar gradualmente el voltaje se observa una variación de la altura y la forma de los pulsos.

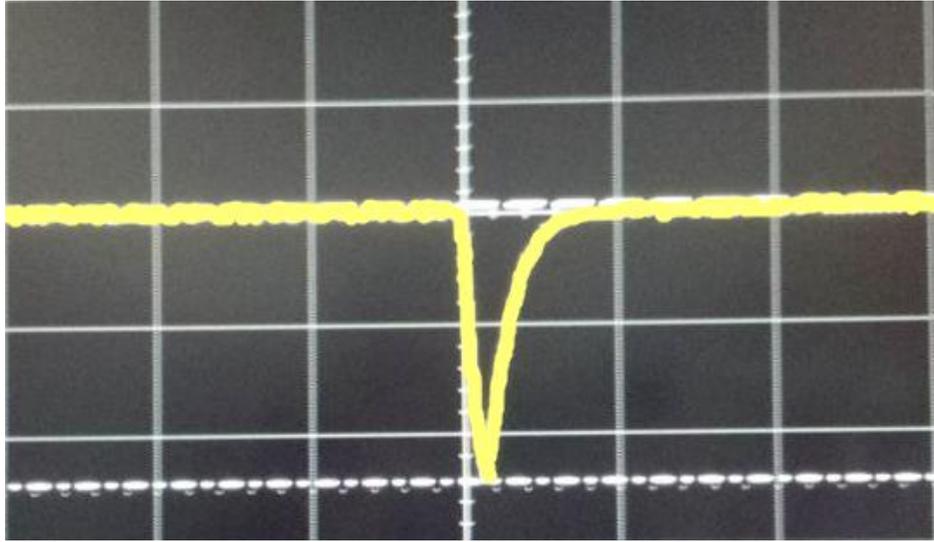


Figura 2.8 Pulso observado en el osciloscopio con polaridad negativa: a 100 ns/div ,20 mv/div y con un trigger de -10,5 mV con pendiente negativa.

Se presentan pulsos típicos para cada mezcla de gases, como se ilustra la figura 2- 9. Los pulsos ilustrados en la figura 2-10, no fueron tomados en cuenta al estar por encima del voltaje de operación. Estos pulsos presentan deformación o presencia de chispas.

Los rangos de voltaje de operación, en los que funciona el detector, sin presencia de chispas, se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Rangos de voltaje de operación para cada mezcla de gas.

Mezcla de Gas	Rangos de Voltaje de operación (V)
Argón	1400 - 2400
Aire	2850 – 4600
Metano	2200 – 2800
P-10	2600 – 4000

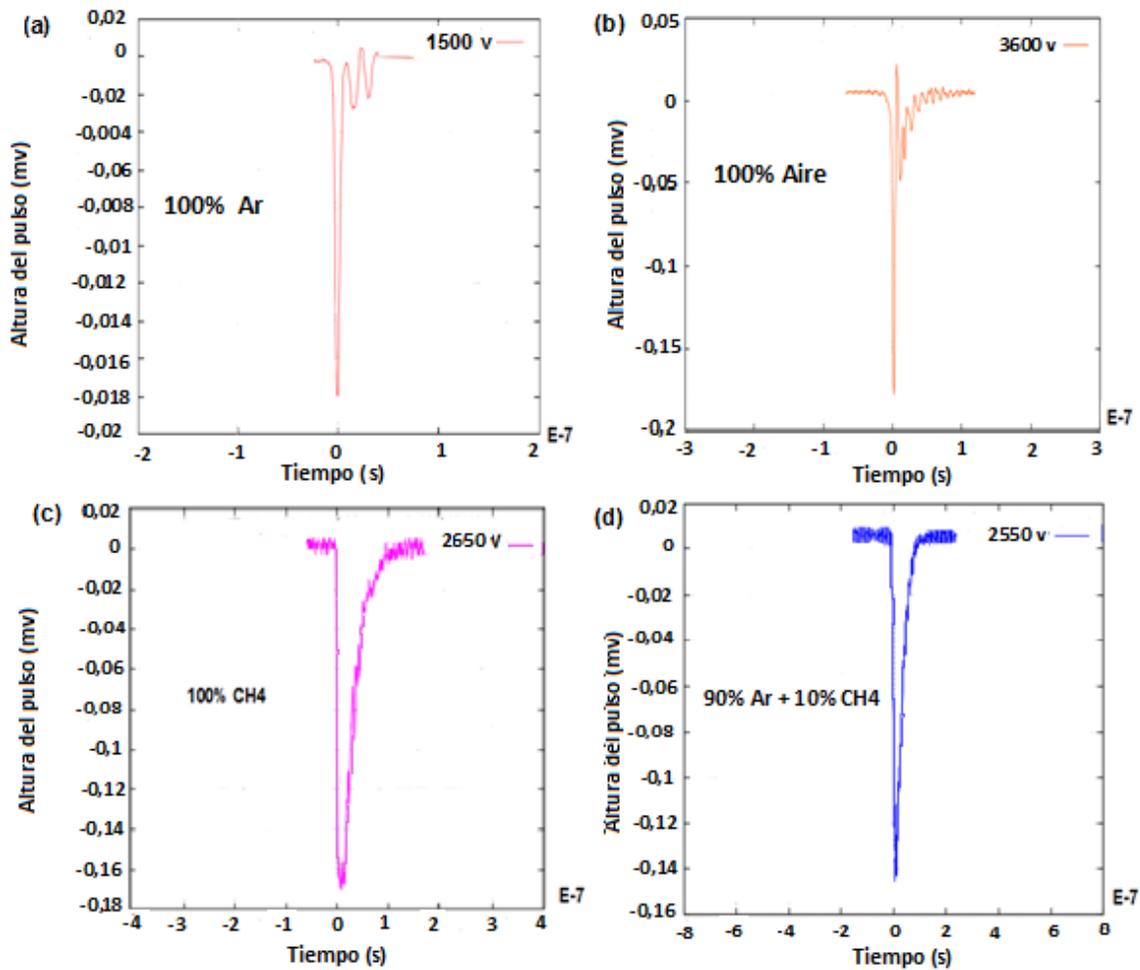


Figura 2-9 Pulsos típicos de las diferentes mezclas de gas: Los pulsos fueron tomados en modo promediado de 100 muestras, en el osciloscopio. **(a)** El pulso típico para 100% Argón, se observa claramente en el osciloscopio (50 ns/div, 200 mV/div) después de 1400 V. Al llegar a un voltaje cercano a 2450 V, se presenta una deformación del pico y al llegar a los 3000 V se presentan chispas en el detector. **(b)** El primer pulso para 100% aire se observa en el osciloscopio (50 ns/div, 100 mV/div) a 2850 V. Se presentan chispas al llegar a 4700 V. **(c)** Para 100% metano, a 2200 V se observa el primer pulso claramente en el osciloscopio (50 ns/div, 100 mV/div), presentando chispas a 2800 V. **(d)** Por último, se observa un pulso inicial (200 ns/div, 100 mV/div) para la mezcla 90% Argón y 10% Metano a 2600 V y se obtiene una deformación a 4000 V. La mezcla P-10 en comparación a las otras mezclas, presenta un pulso inicial a menor voltaje y mayor estabilidad en la toma de datos.

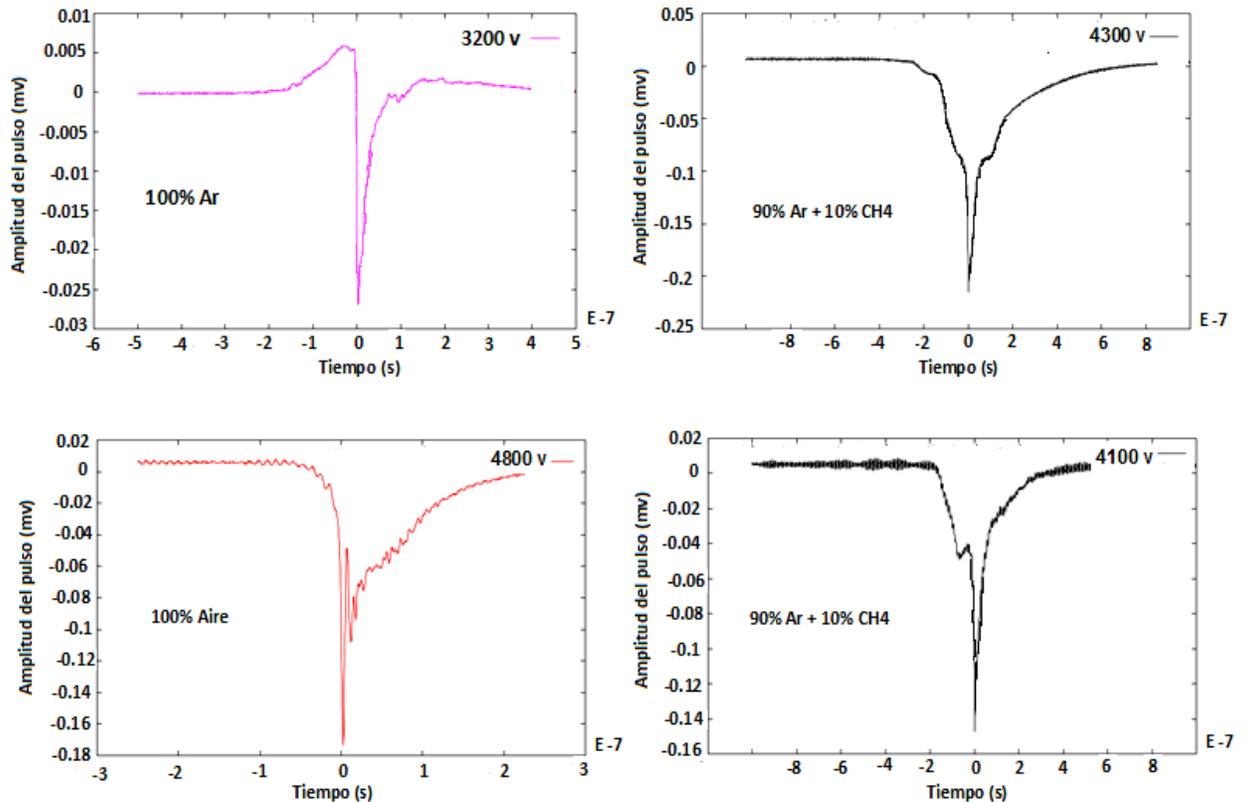


Figura 2-10 Deformación de los pulsos: Al presentarse alguno de estos pulsos en cierto valor de voltaje por encima del rango de operación adecuado, se registraba un conteo inestable de muones, un aumento de corriente, o chispas en la MWPC. No se realizaron medidas en estos casos, puesto que puede alterar la lectura en la electrónica.

2.2.3. Curva Característica

El circuito ilustrado en la figura 2-11, fue utilizado para obtener la curva característica del detector. Este circuito consta de un amplificador y un osciloscopio. Se registró la amplitud y el ancho del pulso, promediado a 100 muestras en el osciloscopio para cada voltaje, con un factor de amplificación de 10.

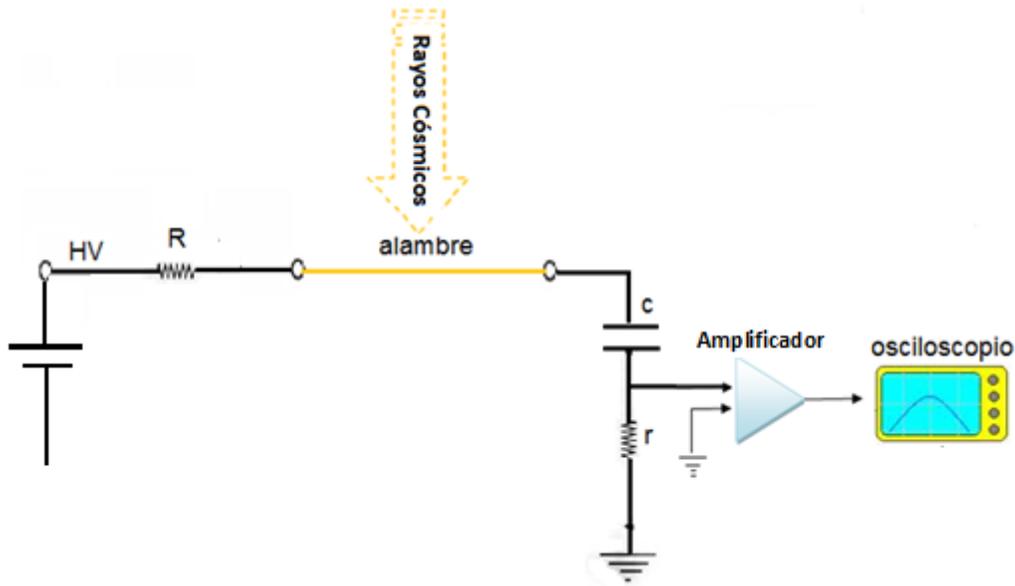


Figura 2-11 Configuración del circuito para la obtención de la curva característica: Se conectó la señal de la MWPC al Amplificador. A la salida del amplificador se conectó al osciloscopio para poder determinar la variación de amplitud de los pulsos a medida que se aumentaba el voltaje.

Con los pulsos obtenidos, se calculó el número de iones colectados, utilizando la ecuación (22), donde A corresponde al área bajo la curva del pulso en función del tiempo y r representa la resistencia (50Ω). Este cálculo, se realizó con un código de programación en C++, el cual permitió mayor precisión.

$$Q = \frac{A}{r e} \quad (22)$$

Se realizó la gráfica del número de iones colectados en función del voltaje. La figura 2-12 muestra un gráfico log-lineal de los resultados obtenidos con cada tipo de gas.

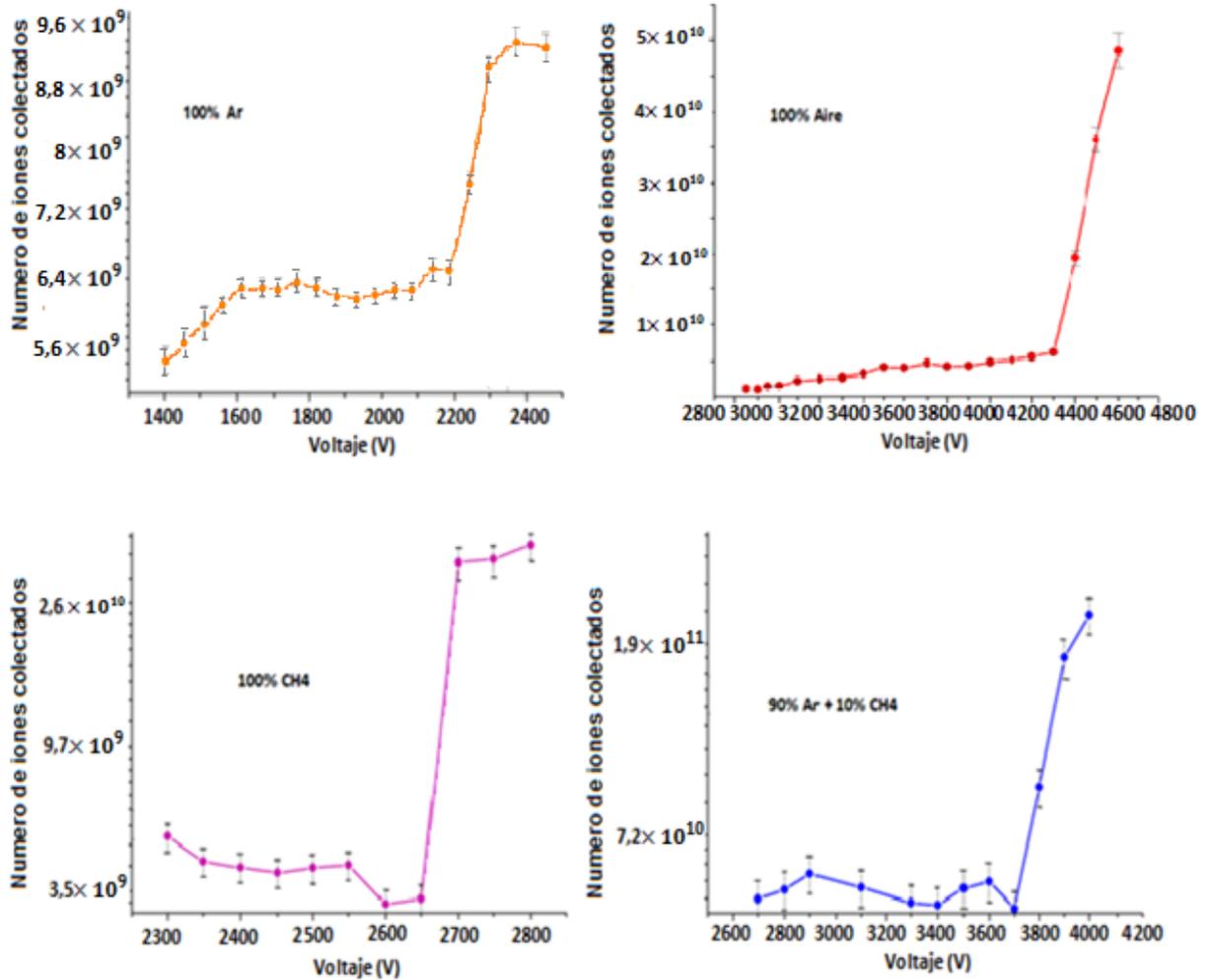


Figura 2-12 Número de iones colectados en función del Voltaje. Se puede observar los diferentes rangos de voltaje en los que opera la MWPC con diferentes tipos de gases. Teniendo un mínimo de voltaje de operación con el Argón en 1400 V, un máximo voltaje de operación final de 4600 V con el Aire y una máxima ganancia con la mezcla P-10.

(a) Argón

La MWPC fue operada con un flujo constante de 100% Argón de 2 L/h. El voltaje se incrementó cada 100 V, desde 0 V hasta 3000 V. Se observaron claramente pulsos en el osciloscopio (50 ns/div, 200 mV/div) a 1400 V. Al llegar a los 3000 V se presentaron chispas en el detector.

En la gráfica (a), se observa que entre 1400 V y 1600 V hay un pequeño aumento en el número de iones colectados, esto se debe a que el campo eléctrico no es lo suficientemente intenso para recolectar las cargas generadas por la ionización del gas, generando una recombinación de iones. Entre 1600 V a 2100 V, se puede observar que el número de iones no cambia notablemente al aumentar el voltaje, por lo que no hay presencia de ionizaciones secundarias ni recombinación, es decir que todos los iones primarios son recolectados en los ánodos. A partir de 2200 V se observa un aumento en el número de iones colectados a medida que se incrementa el voltaje, en donde los iones iniciales se aceleran creando nuevos pares de iones, comportándose de modo proporcional.

El notable aumento del número de iones que se observa después de los 2200 V, representa la formación de avalanchas secundarias y terciarias, cambios en el campo eléctrico y emisión de fotones producidos por efecto fotoeléctrico. Estos efectos son muy comunes en el modo de operación de Streamer [20].

A partir de los 2500 V la cámara empieza a descargarse generando chispas y el número de iones colectados disminuye, impidiendo llegar a la zona de proporcionalidad limitada.

(b) Aire

La MWPC fue operada con un flujo constante de 100% Aire. El voltaje se incrementó cada 50 V, de 0 V hasta 4600 V. Se observan pulsos en el osciloscopio (50 ns/div , 200 mV/div) a partir de los 3000 V. Al llegar a un voltaje cercano a 4650 V, se presentan deformaciones de los pulsos, como lo ilustra la figura 2-10.

En la gráfica (b), se observa que para voltajes menores a 4400 V, hay un aumento sistemático de la carga colectada a medida que aumenta el voltaje. A

partir de 4400 V, se asume un efecto de multiplicación del gas en forma proporcional. Después de 4800 V se presentan chispas en la MWPC.

El aire aunque requiere de mayor voltaje para generar un efecto de multiplicación, puede servir como gas proporcional aceptable bajo circunstancias especiales, descritas en la referencia [7], que garantizan más avalanchas cerca al alambre.

(c) Metano

La MWPC fue operada con un flujo constante de 2 L/h. El voltaje se incrementó cada 100 V, desde 0 V hasta 2800 V. Se observan pulsos en el osciloscopio (100 ns/div , 200 mV/div) a partir de 2200 V. Al llegar a 2900 V se presentan chispas en el detector.

La curva de carga colectada en función del voltaje para el Metano, presenta de 2200 V hasta 2600 V, una zona en donde el numero de iones colectados no cambia notablemente a medida que aumenta el voltaje, lo cual puede representar una recolección de los iones primarios, sin presencia de una segunda ionización. Con un voltaje mayor de 2650 V, se observa un incremento abrupto de la carga colectada, lo que se puede atribuir a un efecto de avalancha, indicando que el detector se encuentra probablemente en un modo de operación de Streamer. En 2700 V se presenta una meseta de estabilidad, esto se puede deber a que la mayoría de los electrones colisionan con las moléculas del gas sin ionizarlas, llegando a un valor constante de ganancia hasta los 2800 V, después de este voltaje se presenta una saturación del detector, sin tener señal alguna en el osciloscopio.

El Metano aunque es más utilizado como un gas de sofocación, también es utilizado como un gas proporcional para espectroscopia de neutrones [21].

Requiere de mayor voltaje para generar una ionización y un efecto de multiplicación de carga [22].

(d) Mezcla P-10: 90% Ar + 10% CH₄

La MWPC fue operada con un flujo constante de 4,5 L/h para el Argón y 0,01 L/min para el Metano. El voltaje se incrementó cada 100 V, desde 0 V hasta 4000 V. Se observan pulsos en el osciloscopio (200 ns/div, 100 mV/div) a partir de 2200 V. Al llegar a 4050 V se presentan chispas en el detector.

Los pulsos obtenidos entre voltajes de 2600 V a 3600 V, se observan pequeñas señales causadas por los iones primarios, los cuales no aumentan con el voltaje. Para voltajes más altos de 3700 V hasta los 4000 V, aumenta la carga colectada, por un efecto de multiplicación de la carga, coincidiendo con lo esperado en la zona proporcional. Para voltajes mayores de 4000 V se presentan chispas en el detector.

La mezcla P-10, en comparación con las otras mezclas de gases, presenta un mayor rango de voltaje de operación, mayor ganancia, buen funcionamiento por más tiempo y trabaja en modo proporcional. Estos resultados se resumen en la tabla 6.

Por otro lado, el Argón presenta una menor ganancia, esto se puede deber a que durante el proceso de avalancha los átomos son excitados e ionizados. Los átomos que son excitados, no contribuyen a la avalancha, pero decaen a su estado base emitiendo un fotón. Estos fotones pueden generar falsas avalanchas, descargas de la cámara y poco aumento de ganancia.

Se puede concluir que cada gas requiere un voltaje necesario para producir una ionización. En la curva característica de cada gas, se observa una zona en donde el número de iones colectados aumenta en función voltaje, evidenciando la presencia de un efecto de multiplicación, lo cual se observada con más estabilidad en la mezcla P-10.

Tabla 6 Voltajes de operación y Máxima ganancia obtenida para cada tipo de gas.

Gas	Voltaje de operación (V)	Ganancia
Ar	1400-2400	$9,6 \times 10^9$
Aire	2850-4600	5×10^{10}
CH₄	2200-2800	$3,8 \times 10^{10}$
P-10	2600-4000	2×10^{11}

2.4.3 Curva de Conteo vs Voltaje

La configuración de la figura 2-13, fue utilizada para obtener la curva de conteo en función del voltaje, también conocida como la curva Plateau. Se registro el número de muones provenientes de la radiación cósmica, para cada voltaje. Este procedimiento se realizó en varias ocasiones durante varias semanas, para cada tipo de gas.

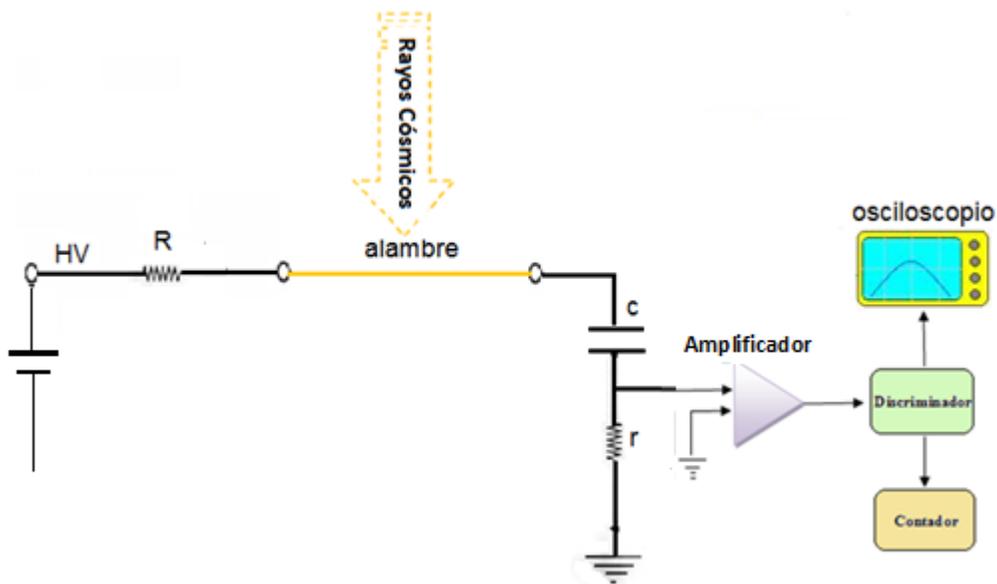


Figura 2-13 Configuración del circuito para obtener la curva de conteo: La MWPC se conecta al amplificador. De la salida del amplificador, se conecta al discriminador. De las dos salidas del discriminador se conecta al contador y al osciloscopio.

Antes de iniciar el conteo de muones, se ajustó el valor de discriminación con cada mezcla (120 a -250 mV) para disminuir el ruido. El conteo de muones, se realizó en intervalos de tiempo de 10 s, 30 s o 60 s, dependiendo de la mezcla utilizada.

Se tomaron 3 datos por cada voltaje, calculando un valor promedio, la desviación estándar y la tasa de conteos. Los cálculos detallados se encuentran en el apéndice A.

Con estos datos, se graficó el número de cuentas por segundo (CPS), en función del voltaje mostrado en la figura 2-14.

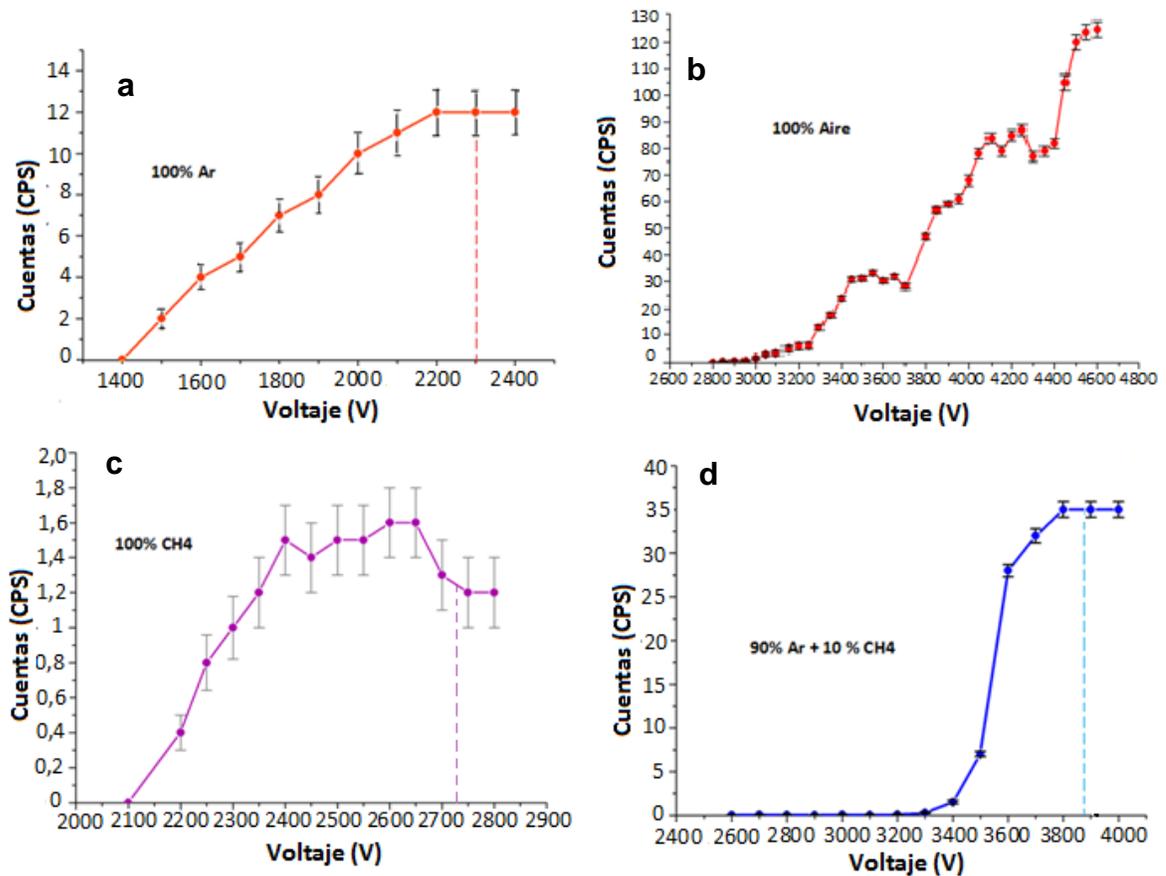


Figura 2-14: Cuentas por segundo en función del voltaje: Determinando el voltaje de operación del detector, en el 25% del Plateau [22], es decir en la región de menor pendiente, se observa para el **argón (a)**, el Plateau inicia en 2200 V y se mantiene hasta 2400 V, estando el voltaje de operación en los 2250 V. **(b)** Para el **aire**, se puede apreciar que a partir de 4500 V no se alcanza a formar la planicie, por lo que no presenta un punto estable para reproducir o tomar medidas. Para el **metano (c)**, se obtiene una planicie que inicia a 2700 V hasta los 2800 V, estableciendo el voltaje de operación a 2725 V. Por otro lado, para la **mezcla P-10 (d)**, se observa la planicie de 3800 voltios hasta 4000 V, determinando el voltaje de operación a 3850 V. Fuera de estos intervalos de voltaje, se puede estar tomando una señal alterada o falsa.

A partir de las curvas del Argón, el metano y la mezcla P-10, se calculó la pendiente de la planicie, para comprobar si la cámara se encuentra en buen estado al obtener una pendiente $\ll 10\%$ [23]. La pendiente se calculó con los puntos (V_1, g_1) y (V_2, g_2) de los extremos utilizando la relación:

$$P = \frac{g_2 - g_1}{g_1(V_2 - V_1)} \times 100(V)\% \quad (22)$$

Donde g es la tasa de cuentas, definida como $Tasa/seg = \frac{\mu \pm \sigma}{t}$. Se divide por g y se multiplica por 100 % V, para obtener la pendiente como porcentaje adimensional.

Reemplazando los datos registrados en el apéndice A para el Argón, se obtiene:

$$P = \frac{(12,4 \pm 1,1 \text{ c/s}) - (12,5 \pm 1,1 \text{ c/s})}{12,5 \pm 1,1 \text{ c/s} (2400 \text{ V} - 2200 \text{ V})} \times 100(V)\% = 0,004 \pm 1,1 \%$$

Realizando el mismo proceso para el metano, se obtiene:

$$P = \frac{(1,2 \pm 0,2 \text{ c/s}) - (1,3 \pm 0,2 \text{ c/s})}{1,3 \pm 0,2 \text{ c/s} (2800 \text{ V} - 2700 \text{ V})} \times 100(V)\% = -0,08 \pm 0,2 \%$$

Realizando el mismo proceso para la mezcla P-10, se obtiene:

$$P = \frac{(35 \pm 0,8 \text{ c/s}) - (35 \pm 0,8 \text{ c/s})}{35 \pm 0,8 \text{ c/s} (4000 \text{ V} - 3800 \text{ V})} \times 100(V)\% = 0 \pm 0,8 \%$$

Entre más pequeña sea la pendiente mejor es la zona de operación del detector [23], como se observa en la mezcla P-10, se garantiza un correcto funcionamiento de la cámara, con variaciones mínimas en la tasa de conteo y muestra condiciones aceptables para realizar con certeza nuevas mediciones a 3850 V.

Se presenta en la tabla 7, los parámetros que caracterizan la curva de conteo para cada tipo de gas. Se encontró un mayor conteo de partículas para el aire y un menor conteo de partículas para el metano; lo cual se debe a las propiedades de los diferentes tipos de gases utilizados como: la pérdida de energía, movilidad de los iones, entre otras, presentadas en las tablas 1, 2 y 3 [24].

Tabla 7: Datos obtenidos de la Caracterización de la curva de conteo. Se registra las máximas cuentas por segundo, el voltaje de operación en el que mejor funciona la cámara y la pendiente del Plateau obtenido para cada tipo de gas.

Gas	Cuentas por Segundo (CPS)	Voltaje de operación (V)	Pendiente
Ar	12 ± 1,1	2250	0,004 ± 1,1%
Aire	125 ± 2	-	-
CH₄	1,2 ± 0,2	2725	-0,08 ± 0,2%
P-10	35 ± 8	3850	0 ± 0,8%

Conclusiones

Se diseñó y construyó una Cámara Proporcional de Multialambres (MWPC). Se caracterizó con cuatro tipos de gases: 100% aire, 100% Argón (Ar), 100% metano (CH₄), y la mezcla P10 (90% Ar + 10% CH₄).

Los mejores resultados de la caracterización se obtuvieron con la Mezcla P-10 (90% Ar + 10% CH₄), para un intervalo de voltaje de operación sin presencia de chispas entre 2600 V a 4000 V.

De acuerdo a la curva característica de la cámara con la mezcla P-10, se observó una zona de ionización entre voltajes de 2600 V a 3600 V, sin un aumento considerable del número de iones. Para voltajes de 3700 V a 4000 V se puede concluir que la cámara funciona en la zona proporcional, alcanzando una mayor ganancia de 2×10^{11} . Para voltajes mayores de 4000 V se presentaron chispas en el detector.

Con la curva de conteo, se logró identificar la zona de Plateau con una mínima pendiente a un voltaje de operación de 3850 V.

En definitiva, se cumplió satisfactoriamente el objetivo de caracterizar una cámara proporcional de Multialambres, la cual cumplió con éxito las distintas pruebas experimentales realizadas. Se espera en un futuro probar la MWPC con rayos x y

otros tipos de radiación para hacer de está un elemento útil en la física de Altas energías y en la física médica.

Apéndice A: Tabla de datos curva de conteo en función del voltaje.

El cálculo de error de las medidas obtenidas para la curva de conteo en función del voltaje, se realizó teniendo en cuenta la estadística de Poisson, calculando la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\mu} \quad [23]$$

Donde μ es el número de cuentas promediadas. Posteriormente se calcula la tasa de cuentas con la relación:

$$Tasa/seg = \frac{\mu \pm \sigma}{t} \quad [24]$$

Teniendo presente estas relaciones, se realizó la tabla de valores y la curva entre el número de cuentas por segundo (CPS) vs Voltaje, para cada mezcla de gas; a continuación se ilustran las tablas con los resultados obtenidos.

ARGÓN

Tabla 8: Después de obtener el pulso y diferenciarlo del ruido electrónico, se registra los conteos a medida que se aumenta el voltaje cada 100 voltios. Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo de 10 segundos, tomando 3 datos por cada voltaje.

Voltaje (V)	Cuentas (cada 30 s)	\bar{x}	σ	G (cuentas/s)
0-1400	0	0	0	0
1500	24,23,25	24	4,9	$2,4 \pm 0,5$
1600	35,37,36	36	6	$3,6 \pm 0,6$
1700	50,49,49	49	7	$4,9 \pm 0,7$
1800	67, 65 , 65	66	8,1	$6,6 \pm 0,8$
1900	83, 84,84	84	9,2	$8,4 \pm 0,9$
2000	97,99,103	100	10	10 ± 1
2100	112,114,118	115	10,7	$11,5 \pm 1,1$
2200	127,126,123	125	11,2	$12,5 \pm 1,1$
2300	127,123,123	124	11,1	$12,4 \pm 1,1$
2400	128, 121, 123	124	11,1	$12,4 \pm 1,1$

AIRE

Tabla 9: Después de obtener el pulso y diferenciarlo del ruido electrónico, se registra los conteos a medida que se aumenta el voltaje cada 50 voltios. Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo de 30 segundos, tomando 3 datos por cada voltaje.

Voltaje (V)	Cuentas	\bar{x}	σ	G (cuentas/s)
0-2800	0	0	0	0
2850	17,15,14	15	3,9	0,5 ± 0,1
2900	18,20,21	20	4,5	0,6 ± 0,1
2950	20,22,25	22	4,7	0,7 ± 0,2
3000	39, 54 , 64	52	7,2	1,7 ± 0,2
3050	73, 98,98	90	9,5	3 ± 0,3
3100	97,99,103	102	10,1	3,4 ± 0,3
3150	143,140,150	144	12	4,8 ± 0,4
3200	188,179,142	170	13	5,7 ± 0,4
3250	158,194,182	178	13,3	5,9 ± 0,5
3300	285, 410, 461	385	19,6	12,8 ± 0,6
3350	518,510,569	532	23,1	17,7 ± 0,8

3400	683,705,748	712	26,7	23,7 ± 0,9
3450	925,917,928	923	30,4	30,8 ± 1
3500	963,940,909	937	30,6	31,2 ± 1
3550	937,1050,1022	1003	31,8	33,4 ± 1,1
3600	916,903,910	910	30,2	30,3 ± 1
3650	974,943,952	956	30,9	31,9 ± 1
3700	868,807,870	848	29,1	28,2 ± 1
3800	1335,1435,1461	1410	37,5	47± 1
3850	1688,1696,1754	1712	41,4	57± 1
3900	1829,1824,1685	1779	42,2	59± 1
3950	1836,1858,1884	1859	43,1	61± 1
4000	1955, 2045,2138	2046	45,2	68± 1
4050	2277,2315,2449	2347	48,4	78± 1
4100	2641,2543,2418	2534	50,3	84± 1
4150	2574,2440,2111	2375	48,7	79± 1

4200	2571,2471,2665	2569	50,7	85± 1
4250	2750,2925,2194	2623	51,2	87± 1
4300	2254,2291,2441	2329	48,2	77± 1
4350	2300,2407,2450	2386	48,8	79± 1
4400	2317,2470,2641	2476	49,7	82± 1
4450	2950,3131,3368	3150	56,1	105± 1
4500	3291,3408,4116	3605	60,1	120± 2
4550	3602,3826,3738	3722	61,1	124± 2
4600	3657,3935,3742	3778	61,5	125± 2

METANO

Tabla 10 : Después de obtener el pulso y diferenciarlo del ruido electrónico, se registra los conteos a medida que se aumenta el voltaje cada 50 voltios. Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo de 30 segundos, tomando 3 datos por cada voltaje.

Voltaje (V)	Cuentas	\bar{x}	σ	G (cuentas/s)
0-2150	0	0	0	0
2200	13,12,9	11	3,3	0,36±0,11
2250	23,25,25	24	4,9	0,8±0,16
2300	29,32,28	30	5,4	1±0,18
2350	39,35,39	38	6,2	1,2±0,2
2400	44,45,43	44	6,6	1,5±0,2
2450	44,41,43	43	6,5	1,4±0,2
2500	47,42,42	44	6,6	1,5±0,2
2550	47,46,43	45	6,7	1,5±0,2
2600	49,51,50	50	7,1	1,6±0,2
2650	51,44,45	47	6,8	1,6±0,2
2700	39,43,36	39	6,2	1,3±0,2
2750	33,37,40	37	6,2	1,2±0,2
2800	35,37,38	37	6,2	1,2±0,2

MEZCLA P-10

Tabla 11: Después de obtener el pulso y diferenciarlo del ruido electrónico, se registra los conteos a medida que se aumenta el voltaje cada 100 voltios. Las mediciones se realizaron en intervalos de tiempo de 60 segundos, tomando 3 datos por cada voltaje.

Voltaje (V)	Cuentas	\bar{x}	σ	G (cuentas/s)
0-2500	0	0	0	0
2600	0,1,2	1	1	0,02±0,02
2700	0, 4 ,7	4	2	0,06 ± 0,03
2800	0,1,8	3	1,7	0,05±0,02
2900	2,2,3	2	1,4	0,03±0,2
3000	3,3,5	4	2	0,06±0,03
3100	3,3,4	3	1,7	0,05±0,02
3200	2,5,8	5	2,2	0,08±0,04
3300	16,19,21	19	4,4	0,3±0,07
3400	60,97,106	88	9,4	1,5 ± 0,2
3500	404,408,428	413	20,3	7±0,3
3600	1315, 1520,2259	1698	41,2	28±0,7
3700	1586,1867,2306	1920	43,8	32± 0,7

3800	1819 , 2459, 2021	2100	45,8	35±0,8
3900	2459, 1738,2104	2100	45,8	35±0,8
4000	2280,2104,1915	2100	45,8	35±0,8

Bibliografía

- [1] W.R.Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1987.
- [2] G.F. Knoll: Radiation Detection and Measurement, J. Wiley&Sons, New York 1989.
- [3] F.Sauli, Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers, yellow report CERN 77-09 (lectures in CERN academic training program)..
- [4] Charles C. Thomas, Springfield, Illinois The science of ionizing radiation; 1965, EE..
- [5] E. Grupen Clauss and Shuwartz, Particle Detectors, Cambridge Monographs on particle physics, Nuclear Physics and Cosmology, segunda edición,2008.
- [6] Tavernier Stefaan, Experimental Techniques in nuclear and Particle Physics, Springer,2010
- [7] W.E.Burcham, Física Nuclear, Editorial Reverté, 1974.
- [8] F.N. Flakus, Detección y medición de las radiaciones ionizantes: historia sucinta, OIEA BOLETÍN, VOL. 23, n° 4..
- [9] K.Kleinknecht: Detectors for particle radiation, Cambridge University Press, Cambridge 1986..
- [10] R.Alfaro, Construction and operation of a small Multiwire proportional chamber,Journal of Physics , Ser 18 362,2005.
- [11] Serge Durte Pinto, Micropattern gas detector technologies and applications The work of the RD51 collaboration, Physikalisches Institut der Universität Bonn, Bonn, Germany v1, 2010..
- [12] A.C. Pichel, P. Galagovsky, D. Abriola, Caracterización de un detector de muones, ANALES ALFA Vol 18, 2006.
- [13] W. Blum, L. Rolandi: Particle detection with driftchambers, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 1993..
- [14] G. Charpak et al.: Detection of far-ultraviolet photons with the multistep avalanche chamber Nucl.Instr.Meth. 164 (1979) 419-433.

-
- [15] Archana Sharma, Gaseous Micropattern Detectors: High-Energy Physics and Beyond Archana Sharma, University of Maryland, College Park, 20742 MD, USA.
- [16] k.TITTEL, E.E. Kluge, Physics in collision 13. Ed frontiers, Heidelberg , Germany. 1993..
- [17] G. Flügge, B. Koppitz, R. Kotthaus, H. Iierl Review of Contributed Paperson Experimentation at LEP, Institut für Kernphysik, 1980.
- [18] G.G. Eichholz and J.W. Poston: Principles of nuclear radiation detection, Ann Arbor Science Publ., Ann Arbor, 1979.
- [19] I. Veress and A. Montvai: Survey on Multiwire proportional chambers, Nucl.Instr.Meth. 156 (1978) 73-80.
- [20] G. Charpak and F. Sauli: Multiwire proportional chambers and drift chambers, Nucl.Instr.Meth. 162 (1979) 405-428.
- [21] F. Sauli: Basic processes in time projection like detectors, invited talk at the TPC workshop, Vancouver, June 1983. Preprint CERN-EP/83-103.
- [22] Gilmore, W.B. Atwood at the 1980 SLAC summer institute on particle physics, SLAC Report #239, Jan.1981 pp 177-308.
- [23] F. Sauli: Limiting accuracies in multiwire proportional and drift chambers, Nucl.Instr.Meth. 156 (1978) 147-157.
- [24] A. Breskin, G. Charpak et al.: The multistep avalanche chamber: a new family of fast, high-rate particle detectors, Nucl.Instr.Meth. 161 (1979) 19-34.
- [25] K. Kleinknecht: Particle detectors, lectures at St.Croix summer school: Techniques and concepts of high energy physics (T.Ferbel, ed.) Plenum Press, 1981, pp 459-509.
- [26] R.Alfaro, E. Belmont Moreno, A. Cervantes, V. Grabski, J.M. López Robles, L.Manzanilla, A. Martínez Dávalos.
- [27] F. Arqueros, Rayos Cósmicos: Las partículas más energéticas de la naturaleza, "A distancia", 1994.
- [28] R.F. Doolittle, U.Pollvogt, A.J. Eskovitz TRW Systems Group, Multiwire Proportional Chamber Development, National Aeronautics and Space Administration, Houston Texas, 1973.
- [29] Ioannis Giomataris, CEA-Saclay. (CERN Courier Nov 30, 2010 Georges Charpak –

- a true man of science- International Journal of High-Energy Physics).
- [30] S. Duarte Pinto, Proc. of the XLVII Int. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, 2009, 26.
- [31] E. E. Babichev et al (1992) Nucl Instrum Methods Phys Res A323: 49, and references therein, S. Baru et al, Novosibirsk Preprint 35(1989) 98-39..
- [32] D.A. Bromley Nuclear Instruments and Methods , Detectors in nuclear science Ed., Vol. 162 N2 1-3, Parts I y II (1979).
- [33] H.Raether. Electron Avalanches and Breakdown in Gases,Butter-Worths,London,1964.
- [34] Historical note thermoluminescent dosimetry (LiF) 1950— 1951 L.F. Heckeisberg Health Physics Vol.39, págs. 391-393 (1980).
- [35] B. Rossi, High Energy Particles. Prentice Hall Incorporate, New York 1961.
- [36] A. Tamarro. Radiaciones Ionizantes,Instalaciones Radiactivas y rayos X. JEN, 1986.
- [37] G. Velarde.Física Nuclear.UPM, 1984.
- [38] CWillmott, L.Romero.Fabricación y verificación de cámaras Z:Manual de procedimiento.CIEMAT.1986.
- [39] The CMS Collaboration, The Compact Muon Solenoid, Technical Proposal,CERN/LHCC/94-38,1994.
- [40] E. Gregersen, The Britannica guide to particle physics, First ed., M. I. Levy y H. M. Moore Niver, Edits., New York: The Rosen Publishing Group & Rosen Educational Services, 2011.
- [41] Bock,R,Wire fixation for proportional and drift chambers using a Cu-Te alloy,1993.
- [42] F.Antonio,Física nuclear de partículas, Universidd de Valencia, segunda edición,2006.
- [43] B. R. Martin y G. Shaw, Particle Physics, 3 ed., F. K. Loebinger, F. Mandl y D. J. Sandiford, Edits., Manchester: Wiley, 2008.
- [44] E. Henley y a. García, Subatomic Physics, 3rd ed., Washington: World Scientific, 2008.
- [45] C.F.G Delaney. E.C.Finch. Radiation Detectors. Physical Principles and Applications, Oxford Science publications.