

01192



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“INSTRUMENTACION DE UN SISTEMA DE  
DETECCION PARA RAYOS COSMICOS”**

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA  
(INSTRUMENTACION)**

PRESENTA:

**JUAN MANUEL LOPEZ ROBLES**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. ARTURO MENCHACA ROCHA**



2005

0347363



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimientos**

La conclusión de este trabajo de investigación no hubiera sido posible sin la colaboración de muchas personas con las que me siento en deuda.

Al Dr. Arturo Menchaca por haberme invitado a participar en un proyecto tan multidisciplinario. Agradezco su apoyo, confianza y guía durante toda la realización del presente trabajo.

Al Dr. Rubén Alfaro por compartir conmigo su experiencia y conocimientos en todo lo que respecta a cámaras multialámbricas.

Al Ing. Jean Ballon por su gran ayuda en el diseño, instrumentación y caracterización del detector final, pero sobre todo, por compartir los "secretos" de operación en cámaras multialámbricas.

A los Drs. Ernesto Belmont, Arnulfo Martínez y Varlen Grabski por su asesoría y consejos durante todo mi periodo doctoral.

A los Drs. Rufino Díaz, Neil Bruce, Celia Sánchez, Oleg Kolokoltsev, Eduardo Sandoval y Juan Hernández por su valioso tiempo y comentarios dedicados a la presente tesis.

Al Posgrado en Ingeniería de la UNAM por haberme brindado la invaluable oportunidad de realizar mis estudios de doctorado.

A CONACYT y DGEP por el periodo de beca concedido para realizar mis estudios de doctorado.

Al Ing. Edgar Vázquez por su dedicación y paciencia prestada en la construcción del detector final.

Al Ing. Mario Rangel por su ayuda en la construcción de los distintos elementos mecánicos de los detectores.

Al Fis. Arcadio Huerta y al M. en I. Rafael Macías por su enorme ayuda en la etapa de adquisición y análisis de datos.

Al estudiante Roberto Núñez por su amable apoyo y asesoría en todo lo referente a cómputo.

Al Sr. Ricardo Ramírez por su asesoría en la construcción de las piezas de aluminio y acrílico de cada uno de los detectores.

Al Ing. Francisco Mercado por su ayuda en el diseño de varios elementos mecánicos.

A los M. en C. César Ruiz y Ana Elena Buenfil por sus continuas y amables enseñanzas en todo lo referente al uso de fuentes radiactivas y seguridad radiológica.

A la Sra. Hilda Rodríguez y Martha González por su ayuda en la elaboración de los primeros circuitos electrónicos.

A la Sra. Teresa Cázares por su amable apoyo en la mayoría de mis enredos burocráticos y trámites administrativos.

Al Sr. Karim López y Francisco Jaimes por haberme permitido utilizar algunos módulos de su electrónica en varias etapas experimentales, y por compartir su experiencia en varias áreas de la física experimental.

A mis padres, por recibirme en su hogar y apoyarme en todos los sentidos cuando empecé la escritura de este trabajo, su ayuda fue invaluable para mí.

A mi hermana Vero, por su apoyo y por las toneladas de risas.

A mis compañeros y amigos del Instituto de Física: Vanesa, Magda, Rubén, Roberto, Arcadio, Luis Alberto, Rafael Macías, Lázaro Huerta, Juan Gabriel Morales, Rodolfo Herrera, Armando Flores, Adrián Huerta, Adolfo Zárate, César Ruiz, Hilda Mercado, Guerda Masillon. Me resulta muy difícil expresar la inmensa cantidad de experiencias y momentos gratos que he compartido en los últimos años en el instituto. He aprendido mucho de ustedes, mil gracias.

*“Todas las ideas esenciales de la ciencia han nacido de un conflicto dramático entre la realidad y nuestros deseos de entenderla. La más hermosa de la teorías tiene que ser rechazada si no se ajusta a los hechos”.*

*Albert Einstein*

# Indice

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes y motivación . . . . .	3
1.2 Descripción básica de la cámara multialámbrica . . . . .	3
1.3 Formulación del problema . . . . .	4
1.4 La técnica de digitalización y optimización en resolución . . . . .	5
1.5 Objetivos . . . . .	6
1.6 Principales aportes . . . . .	6
1.7 Organización de la tesis . . . . .	7
<b>2 Rayos Cósmicos y su interacción con la materia</b>	<b>8</b>
2.1 Muones . . . . .	10
2.2 Interacción de muones con materia . . . . .	13
2.2.1 Ionización y excitación . . . . .	13
2.2.2 Bremsstrahlung y producción de pares . . . . .	14
<b>3 Principios de operación en centelleadores y cámaras multialámbricas</b>	<b>16</b>
3.1 Principios de detección en centelleadores plásticos . . . . .	16
3.1.1 Tubo Fotomultiplicador . . . . .	19
3.1.2 Detección de muones con centelleadores . . . . .	22
3.2 Principios de detección en cámaras multialámbricas . . . . .	23
3.2.1 Detección de partículas cargadas . . . . .	24
3.2.2 Producción de rayos $\delta$ . . . . .	26
3.2.3 Alcance de electrones lentos . . . . .	28
3.2.4 Ionización primaria y total . . . . .	29
3.2.5 Ionización y excitación debido a pares secundarios . . . . .	30
3.2.6 Detectores gaseosos . . . . .	31
3.2.7 Aspectos prácticos . . . . .	39
Elección de gas . . . . .	39
Alambres . . . . .	42
Soportes Mecánicos . . . . .	42
3.2.8 Determinación de la posición del evento detectado . . . . .	43

<b>4 Experimento de la Pirámide del Sol</b>	<b>46</b>
4.1 Requerimientos básicos	48
4.2 Condiciones del sitio	52
4.2.1 Aspectos geométricos	52
4.2.2 Condiciones ambientales	55
<b>5 Diseño, construcción e instrumentación del sistema de detección</b>	<b>57</b>
5.1 Detectores de centelleo	57
5.1.1 Plástico Centelleador y elementos asociados	57
5.1.2 Estructura contenedora	60
5.2 Cámara multialámbrica (Prototipos)	65
5.2.1 Materiales	65
Alambre	65
Soldadura	67
Marco del Detector	68
Circuito Impreso	70
Líneas de retardo	71
Gas	73
Máquinas y herramientas a nuestra disposición	75
5.2.2 Construcción de prototipos	76
5.2.2.1 Prototipo A	76
5.2.2.2 Prototipo B	79
5.3 Cámara Multialámbrica (Final)	81
5.3.1 Ánodo	81
5.3.2 Cátodos	89
5.4 Instrumentación electrónica	93
5.4.1 Prototipo A	94
5.4.2 Prototipo B	97
5.4.3 Instrumentación analógica	97
5.4.4 Instrumentación digital	100
5.4.4.1 Experimento de triple coincidencia	102
<b>6 Procedimientos y Resultados</b>	<b>106</b>
6.1 Adquisición analógica de datos	106
6.1.1 Resultados de prototipos	106
6.1.1.1 Prototipo A	107
6.1.1.2 Prototipo B	110
6.1.2 Mediciones con el sistema de detección para muones	112

6.2 Análisis de señales digitalizadas . . . . .	120
6.2.1 Señales de triple coincidencia . . . . .	131
<b>7 Conclusiones . . . . .</b>	<b>134</b>
Apéndice I	
Estructura contenedora de los detectores de centelleo . . . . .	136
Apéndice II	
Especificaciones técnicas de las líneas de retardo . . . . .	137
Apéndice III	
Diagrama del circuito electrónico instrumentado en el prototipo A . . . .	138
Apéndice IV	
Diagrama del circuito electrónico instrumentado en el prototipo B . . . .	139
Apéndice V	
Planos correspondientes a la estructura del ánodo . . . . .	140
Apéndice VI	
Planos correspondientes al separador . . . . .	144
Apéndice VII	
Discriminación por fracción constante . . . . .	148
Apéndice VIII	
Lenguaje LabVIEW . . . . .	150
Apéndice IX	
Análisis de datos con LabVIEW . . . . .	151
<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>155</b>



## Resumen

Se presenta una nueva técnica de adquisición de datos para cámaras multilámbricas (CM), basada en la digitalización de señales rápidas, la cual optimiza la resolución en posición de CM's de gran área basadas en líneas de retardo. Así mismo, se estudiaron los datos adquiridos con un sistema compuesto por una CM de 1 m x 1 m y dos detectores de centelleo, con la misma área efectiva, diseñados para la detección de muones. El desempeño de dos configuraciones alternativas de adquisición de datos fueron comparadas cuantitativamente: la convencional, basada en discriminadores analógicos (CFD's), y la nuestra, utilizando digitalizadores rápidos (5 GS/s), para la cual fue desarrollada una técnica de análisis que emula las etapas de discriminación fuera de línea. Éste último y nuevo método ayudó a obtener una mejor resolución espacial con mayor uniformidad, permitiendo corregir la dependencia en posición de las variaciones con la forma del pulso existentes en las señales a lo largo del detector. La nueva técnica, en la cual no fue necesaria la mayoría de la electrónica convencional usualmente utilizada, es aplicable a experimentos de bajo conteo, tales como mediciones por atenuación de muones en volúmenes de materia considerablemente grandes. El sistema de detección aquí presentado forma parte de un proyecto en la Pirámide del Sol, destinado a buscar posibles cámaras (espacios vacíos) en el cuerpo de la misma, a través del flujo detectado de muones atmosféricos.

## Abstract

A new readout method based on fast waveform digitalization is proposed which improves the position resolution of large Multi-Wire Proportional Chambers (MWPC's) with delay-line readout. Atmospheric muon detection data is presented, obtained with a 1m x 1m, MWPC and two plastic scintillators, having the same sensitive area, used for muon identification purposes. The performance of two alternative DAQ configurations are quantitatively compared: the standard one, based on analog discriminators (CFD's), and one using 5 GS/s waveform digitizers in which a CFD-like analysis is performed offline. The latter and new method is shown to provide better, and more uniform, space resolution, allowing to correct position-dependent rise time variations across the detector. The new technique, in which most of conventional electronics is not necessary, is applicable to low count-rate applications, such as muon attenuation measurements in large matter volumes. The MWPC presented here is part of the muon tracking system of a detector to be used in an experiment to search for hidden chambers (empty spaces) in the Pyramid of the Sun, through muon attenuation measurements.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes y motivación

Dado el creciente número de aplicaciones que se están desarrollando sobre el uso de rayos cósmicos (muones) como técnica de prospección en aplicaciones tan variadas como la búsqueda de cavidades (espacios vacíos) en monumentos históricos [1, 2], monitoreo de actividad volcánica [3] y seguridad fronteriza [4], existe la necesidad de desarrollar sistemas de detección para radiación cósmica cuyas principales características de diseño, construcción y operación los conviertan en una opción práctica y económica. En particular, en México se está desarrollando el proyecto de la Pirámide del Sol, a cargo de investigadores del Instituto de Física de la UNAM, cuya principal meta es la búsqueda de posibles cámaras (espacios vacíos) en el cuerpo de ese monumento, a través de las variaciones espaciales en el flujo detectado de muones atmosféricos.

Este proyecto tiene requerimientos especiales debido a las características inherentes de un equipo destinado a operar en un túnel ubicado debajo de la Pirámide del Sol, con todas las limitaciones físicas, eléctricas e instrumentales existentes en un sitio arqueológico. Es por esto que se planteó el proyecto de diseñar y construir un sistema de detección que cumpliera con las exigencias instrumentales propias de este tipo de experimentos. Dicho sistema debería dar información sobre la dirección de los muones incidentes con la mejor resolución posible, pero además, ser lo suficientemente versátil y práctico, tanto en su etapa de diseño y construcción, así como durante su instrumentación y operación. Otra prioridad era que los costos de su construcción y mantenimiento debían ser tan bajos como fuera posible.

La respuesta a estas necesidades fue un diseño basado en dos tipos de detectores: centelleadores y cámaras multialámbricas (CM). En particular, éstas últimas representaban un gran reto instrumental, debido a las exigencias experimentales impuestas por el proyecto.

### 1.2 Descripción básica de la cámara multialámbrica

El principio de operación de estas cámaras se basa en la ionización producida por el paso de la partícula a través del gas contenido en tales dispositivos, así

como la ulterior recolección - de las cargas - en electrodos diseñados para tal fin. Existen numerosas variables que intervienen en el diseño de cámaras multialámbricas, dependiendo del tipo de partícula a detectar, los voltajes de operación, la mezcla del gas a utilizar, la presión del mismo, las dimensiones de las cámaras, la resolución en posición asociada, así como la eficiencia de detección del conjunto experimental [5].

Una de las principales características de este tipo de arreglos experimentales es su implementación como detectores sensibles a la posición. Al tratar cada alambre como un detector independiente, tenemos la posibilidad de conocer qué alambre fue el que generó la señal. El sistema de adquisición de datos que se siguió en este caso es un método conocido como "línea de retraso de tiempo". Éste se basa en conectar los alambres contenidos en el ánodo con elementos capaces de retrasar la señal de cada alambre una determinada cantidad fija de tiempo, formando una cadena, o línea, de retraso. Dichos elementos reciben el nombre de *Delay lines* o chips de retardo. Como el retraso inducido es conocido y además "discreto" (es decir, se da en pasos fijos), si se toma como referencia uno de los extremos de la cadena y se hace la diferencia respecto al otro, los valores de dicha diferencia son discretos y dependen de cuál fue el alambre en que se generó la señal. Cabe señalar que el manejo estadístico adecuado de toda la información adquirida da como resultado la posición de detección para cada muón analizado, contando así con un espectro cuya forma representa las contribuciones de cada uno de los alambres.

En nuestro caso resultaría ideal desarrollar un sistema de lectura que tenga las ventajas asociadas a la instrumentación en la cual se adquiere la información de cada alambre por separado (o "lectura directa"), pero con la simplicidad y la economía de métodos como el de las líneas de retraso de tiempo, mencionado anteriormente, o el método conocido como "división de carga" [6].

### 1.3 Formulación del problema

Un sistema de detección multialámbrico sensible a muones debe ofrecer un desempeño que asegure la obtención de información asociada con la posición de la radiación cósmica detectada con la mejor eficiencia y resolución posibles. En nuestro caso particular, además de no existir en México sistemas con un área como la que el proyecto de la Pirámide del Sol demandaba ( $1 \text{ m}^2$ ), era muy difícil llegar a aplicar una instrumentación de "lectura directa", debido al elevado costo que esto representaba, aunado al alto consumo de

energía eléctrica necesaria, condición intolerable para un sistema destinado a operar en un sitio arqueológico.

Por tanto, el problema a resolver en este trabajo de tesis estaba relacionado en primer término, con el diseño y construcción de un sistema de detección de gran área para rayos cósmicos, formado por un par de centelleadores y una cámara multialámbrica, que cumpliera con las exigencias geométricas, físicas, eléctricas y de lectura de datos que el proyecto antes mencionado exigía; tomando en cuenta que al inicio de esta investigación, los sistemas multialámbricos más grandes construidos en México tenían un área activa de 5 cm × 5 cm. Además del desarrollo de una técnica instrumental capaz de analizar la información obtenida del arreglo de detectores, buscando así optimizar la resolución en posición del sistema, a través de un método aplicado fuera de línea. Es decir, analizando la información después de haber sido detectada y guardada.

Para resolver el problema planteado, se propuso utilizar un método de digitalización que permitiera realizar un estudio de las principales características temporales de las señales involucradas en la detección de muones. Los lineamientos generales de tal método se exponen a continuación.

#### **1.4 La técnica de digitalización y optimización en resolución**

Con la aparición en el mercado de digitalizadores rápidos (5 GS/s), ahora es posible proponer una nueva técnica que cumple con los requerimientos de simplicidad y optimización citados anteriormente. Ésta se basa en el uso de líneas de retraso, pero en la cual la lectura consiste en digitalizar lo que se observa en ambos extremos de la línea de retardo durante un tiempo equivalente al que tardaría un pulso en recorrer toda la línea. Así, esa señal que contiene la información temporal y de amplitud del pulso, o pulsos, que se generen en ese lapso, puede ser almacenada en forma de un arreglo numérico bidimensional que permite su análisis posterior, vía *software*. De esta forma, se puede simular la operación de los diversos módulos electrónicos que se utilizarían en la versión analógica estándar, con la ventaja de poder variar los parámetros relevantes y, más aún, diseñar rutinas de análisis que actuarían como módulos electrónicos sofisticados, que aún no existen en el mercado. Es decir, se pueden desarrollar algoritmos que emulen las etapas de filtraje, acondicionamiento, discriminación y ajuste temporal aplicado a señales digitalizadas asociadas a la detección de muones.

## 1.5 Objetivos

El presente trabajo de investigación se propone cubrir los siguientes objetivos:

- a) Diseñar, construir e instrumentar un par de detectores de centelleo de  $1 \text{ m}^2$ , destinados a funcionar como dispositivo de disparo o *trigger* para la detección de muones.
- b) Diseñar, construir e instrumentar una cámara multialámbrica con área efectiva de  $1 \text{ m}^2$  y sistema de lectura a través de líneas de retardo sensible a la posición.
- c) Aplicación de una técnica de digitalización y análisis digital de señales destinado a optimizar la resolución en posición de un sistema de detección para rayos cósmicos, formado por dos centelleadores y una cámara multialámbrica.

## 1.6 Principales aportes

Como se verá en el cuerpo de este documento, se cuenta con más de un aporte al campo de la instrumentación de detectores multialámbricos de gran área con sistema de lectura a través de líneas de retardo; no obstante, las aportaciones más sobresalientes son, en primer lugar, el diseño original de una cámara multialámbrica de gran tamaño, en donde la contribución reside primordialmente en su estructura modular y en la implementación de materiales locales para su construcción, que la convierten en un sistema multialámbrico único en su género.

Por otro lado, tenemos el desarrollo de una técnica de análisis digital aplicada fuera de línea, que fue implementada con una tarjeta digitalizadora y un conjunto de algoritmos programados para estudiar las principales características temporales involucradas en el proceso destinado a optimizar la resolución en posición del sistema de detección.

En la literatura asociada tampoco se ha visto el problema de mejorar el desempeño de sistemas instrumentados con líneas de retardo a partir de técnicas aplicadas fuera de línea a las señales obtenidas, planteando un problema abierto de optimización, debido a que los sistemas multialámbricos de gran área en la actualidad optan por una instrumentación de "lectura directa" con análisis en línea, sin importar el costo o el consumo de energía que esto llegue a implicar.

De esta forma, la presente tesis contribuye con un nuevo método capaz de mejorar las características temporales en sistemas sensibles a la posición de gran área para muones atmosféricos.

Por último, se comenta el hecho de que, a partir de este trabajo, se derivó un artículo que ha sido aceptado para su publicación en la *IEEE Transactions on Nuclear Science*.

## **1.7 Organización de la tesis**

La estructura y forma en como se presenta esta tesis es la siguiente. En el capítulo 2 se revisan las principales características de los rayos cósmicos y la forma en que pierden energía al atravesar un medio. Esta información es necesaria para establecer el diseño de los detectores, centelleadores y cámaras multialámbricas, que nos interesan, cuyos principios de funcionamiento son revisados en el capítulo 3.

Más adelante, en el capítulo 4 se describe en detalle el experimento de la Pirámide del Sol, con los requerimientos básicos de este proyecto, sus características y limitaciones. Los detalles del diseño y construcción de los centelleadores y la cámara multialámbrica, así como las características de los materiales utilizados, la instrumentación y electrónica de lectura asociada se exponen en el capítulo 5.

Como consecuencia de la aplicación de una técnica de digitalización y posterior análisis de señales mediante el lenguaje LabVIEW, fue posible optimizar la resolución en posición del arreglo de detectores, la cual se comparó respecto a la información adquirida mediante la electrónica convencional usualmente utilizada. Estos métodos y resultados son presentados en el capítulo 6.

Y finalmente el capítulo 7 contiene las conclusiones y recomendaciones para futuros desarrollos.



## Capítulo 2

### Rayos Cósmicos y su interacción con la materia

La radiación de tipo cósmica ha acompañado a la humanidad desde siempre debido a su naturaleza y existencia que permea el cosmos. Sin embargo, no fue sino hasta 1911 cuando el físico Austriaco Víctor Franz Hess la descubre y obtiene por ello en 1936 el premio Nobel de Física, aunque los primeros experimentos destinados a entender la naturaleza de tal radiación se remontan tiempo atrás.

Fue Charles Wilson en Inglaterra, cuando al realizar en 1900 un estudio minucioso con electros copios descubre la existencia de una radiación capaz de generar iones al interior del electros copio a pesar de que éstos eran extraídos de forma continua por un campo eléctrico externo. Con el estudio de los recientemente descubiertos rayos  $X$  por Roentgen en 1895 y un año más tarde la radiactividad por Becquerel, se encontró que los efectos de estas dos radiaciones coincidían con la radiación que Wilson había encontrado. Así pues, a modo de verificar la hipótesis de Wilson, se construyeron electros copios de distintos materiales y observaron que efectivamente, la ionización variaba dependiendo del tipo de material del que había sido construido y en especial si era cubierto por capas de plomo.

Si la fuente de materia radiactiva es la superficie terrestre, era de suponer que al alejarse de ella, la ionización decreciera, por esta razón y para consolidar esta hipótesis, se realizaron experimentos con electros copios portátiles a diferentes alturas. En 1910 A. Wulf en la cima de la torre Eiffel y A. Gockel en 1911 a 4500 metros en un ascenso en globo, encontraron que efectivamente, la ionización decrecía, pero no de la manera que se esperaba.

En 1911 Hess, tras leer las notas de Gockel, decide corroborarlas por lo que los dos siguientes años los destinaría a realizar mediciones. Apasionado de la aeronáutica, emprende ascensos en globo con los que obtuvo datos que se contraponían a toda teoría antes descrita. Encontró un aumento en la ionización a medida que aumentaba la altura después de los 1800 metros, siendo a 5000 metros 16 veces mayor que en la superficie. Los gases radiactivos existentes en la atmósfera no podían ni siquiera generar una vigésima parte del menor de los resultados, por lo que Hess postuló una nueva hipótesis en la que proponía la existencia de una radiación muy penetrante proveniente del espacio exterior, y que no podía ser de origen solar dado que

no había cambios entre las ionizaciones producidas en el día respecto con las producidas en la noche.

Robert Andrews Millikan en años subsecuentes se dedica a corroborar los datos obtenidos por Hess y encuentra que la trayectoria de esta radiación era de arriba hacia abajo y que el aire sólo servía como un atenuador y no como generador de ella, por lo que se determina su naturaleza extra-atmosférica. Por esta razón, es él quien bautiza con el nombre de *rayos cósmicos* a la recién descubierta radiación. En distintas partes del mundo científicos se dieron a la tarea de reproducir los experimentos a modo de corroborar su veracidad. Con variantes en la forma de realizar las mediciones y con nuevas técnicas de medición ratificaron la información publicada en unos casos y en otros la desecharon abriendo nuevas líneas de investigación [7].

Actualmente se sabe que los rayos cósmicos son partículas subatómicas de alta energía (protones 87%, partículas alfa 12% y otros núcleos pesados) que viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Aunque su origen aún no está bien definido, hay teorías que presumen su generación en estrellas supernovas, pulsares y estrellas masivas, e incluso algunas teorías refieren su origen al inicio mismo del cosmos [8].

Las teorías acerca de la obtención de su energía también son varias, pero hay tres principales que aún no han sido comprobadas. Una plantea que los protones a lo largo de su viaje chocan de frente con núcleos más veloces con lo que adquieren energía, choque tras choque, hasta llegar a nuestro planeta. Otra teoría presume la existencia de campos magnéticos en el cosmos que oscilan permanentemente y cuando un protón es capturado por dichos campos, es llevado a niveles máximos y mínimos de campo magnético, provocando choques frontales con otras partículas adquiriendo así energías tan grandes que después de cierto tiempo eyectan al protón a velocidades cercanas a la de la luz y con energías del orden de cientos de GeV\*. La última teoría a mencionar establece que existen medios turbulentos magnetizados en los que la energía de la turbulencia es cedida al campo magnético y a su vez éste cede la energía a los rayos cósmicos. Aunque se desconoce a ciencia cierta su origen, se estima que los rayos cósmicos han atravesado desde su nacimiento aproximadamente  $50 \text{ kg/m}^2$  de materia antes de llegar a la Tierra, en un tiempo que varía de 1 a 100 millones de años [9].

Para su estudio, la radiación cósmica se ha dividido en primaria y secundaria. Radiación primaria es aquella que está compuesta por todas las partículas (principalmente protones) que han sido aceleradas en fuentes

---

\*  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

astrofísicas. Los rayos cósmicos secundarios son el producto de la interacción de radiación primaria con gases de nuestra atmósfera. Cuando los rayos cósmicos primarios llegan a nuestro planeta, el choque de estos núcleos con los elementos y compuestos que conforman nuestra atmósfera ( $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ , Ar,  $CO_2$ , He, Ne, Kr y Xe) originan partículas como *kaones*, *mesones*, *muones*, *electrones*, *fotones*, *piones*, *neutrinos*, entre otras, además de sus correspondientes antipartículas [10]. La vida media de algunas de estas partículas que conforman la radiación secundaria se caracteriza por ser muy pequeña. Sin embargo, los muones sobresalen por tener un tiempo de vida media que permite que un buen número de ellos lleguen a la superficie terrestre antes de decaer.

La probabilidad de que un protón llegue a la superficie terrestre es casi nula, por la cantidad de materia atmosférica que tiene que atravesar, ya que además de que en cada colisión ceden energía, interaccionan de múltiples formas con la materia que atraviesan reduciendo así la posibilidad de detectarlos a medida que la cantidad de materia que traspasan se incrementa. Sin embargo, a muy grandes alturas se ha logrado su detección.

Esto ocurre a diferentes alturas de nuestra atmósfera por lo que las partículas generadas también son diferentes, por ejemplo, los muones son generados principalmente a 15 km sobre el nivel del mar. Luego de la creación de estas nuevas partículas, hay una probabilidad que éstas tengan una nueva interacción con la materia atmosférica, creando una especie de lluvia cósmica.

## 2.1 Muones

Su descubrimiento fue de tipo accidental, pues se dio en la búsqueda de otras partículas. Yukawa había predicho la existencia de partículas portadoras de energía y causantes de interacciones nucleares, de masa 200 veces mayor a la del electrón y  $1/9$  la del protón. Por tener masa intermedia entre el electrón y el protón es que les llamó *mesones*. Fue Carl Anderson en 1935 quien encontró las partículas de Yukawa, sin embargo, al poco tiempo se percataron de que estos mesones podían chocar libremente con los núcleos sin que éstos los atraparan. Esto se contraponía con la teoría descrita por Yukawa, dejando abandonado el estudio de las partículas que después de 1961 recibieron el nombre de *muones*, cuando se retoma su estudio [7].

Con el vertiginoso desarrollo de la tecnología y la base de conocimientos hasta hoy adquirida acerca de los rayos cósmicos, fue posible que tengamos datos extremadamente precisos acerca de la mayoría de las partículas que componen la ensalada originada por los rayos cósmicos.

Del muón podemos decir que tiene una masa de  $105.6583568 \pm 0.0000052$  MeV, tomando como referencia que la masa en reposo del electrón es de  $0.51099906 \pm 0.00000015$  MeV. Su carga es  $-1e^*$  y su tiempo de vida media es de  $2.19703 \pm 0.00004$   $\mu$ s [11]. Viaja a una velocidad cercana a la de la luz, las energías con que llegan a la ciudad de México son superiores a 8 GeV y con una frecuencia de incidencia 2.3 veces mayor que sobre la línea del Ecuador a nivel del mar. La incidencia de muones en este último punto es de aproximadamente una cuenta por centímetro cuadrado por minuto para detectores horizontales [10]. La mayoría de ellos se producen a 15 km sobre el nivel del mar, sin embargo pierden alrededor de 2 GeV antes de alcanzar el suelo. También sabemos que existen muones positivos y muones negativos.

Los muones positivos tienen mayor facilidad para llegar a la superficie, decayendo en un positrón y un neutrino con su antineutrino. Los muones negativos son más susceptibles a decaer y cuando lo hacen, de la desintegración del muón surge un electrón y una pareja de neutrinos.

Las propiedades principales de los rayos cósmicos son: carga eléctrica, masa en reposo y energía. Desde que Hess descubrió los rayos cósmicos se han empleado distintos aparatos que de manera directa o indirecta rastrean alguna de sus propiedades, ya que esta radiación no es detectada por nuestros sentidos [12].

Para evitar hacer conclusiones erróneas con los resultados arrojados de las mediciones, es importante considerar las variables que afectan ésta radiación. Estos factores son principalmente el ciclo solar, viento solar, el efecto Forbush, el campo magnético terrestre, la altura, la latitud y de manera poco significativa si es de día o de noche.

Al realizar medidas de detección de rayos cósmicos, los científicos encontraron que el Sol era una fuente importante de dispersión de esta radiación. El estudio detallado del fenómeno descubrió que el Sol tiene un ciclo de once años, en el cual aparecen y desaparecen manchas en él, que afectan la incidencia de rayos cósmicos en la Tierra. A este ciclo se le llamó ciclo solar y dadas las variaciones en la intensidad con las que afecta la incidencia de radiación, se definió un máximo y un mínimo solar. En el periodo en el que aparecen mayor número de manchas, la incidencia de muones en la Tierra es menor y viceversa. Aún no se ha dado una explicación completa a este fenómeno, pero se ha monitoreado desde 1955 encontrando a lo largo de los años, que la variación no excede el 20% [8].

El viento solar desvía la radiación cósmica, pues se descubrió que es capaz de llegar a grandes distancias más allá de nuestro planeta, generando un

---

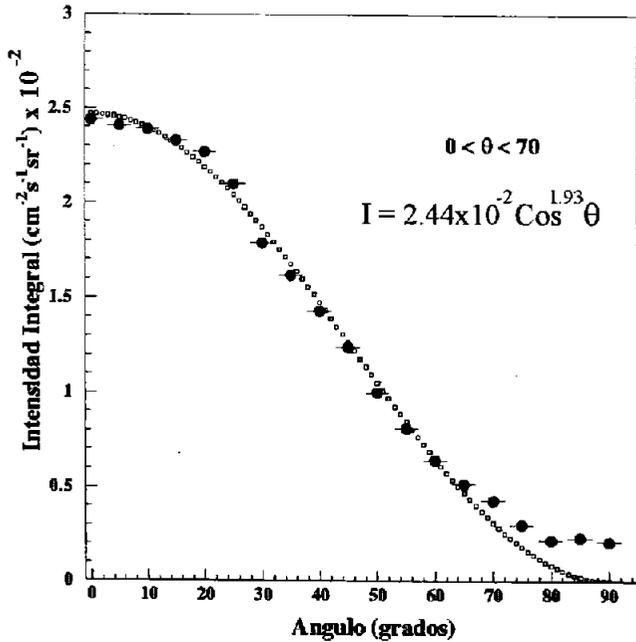
\*  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C

campo magnético que altera sus trayectorias. El que sea de día o de noche también afecta la llegada de los rayos cósmicos, aunque de manera muy poco significativa, sólo el 0.02%, y es indirectamente también consecuencia del viento solar.

El efecto llamado Forbush es muy peculiar, ya que en un día, en cuestión de horas el flujo de rayos cósmicos disminuye hasta en un 30%, recuperando la intensidad en los siguientes días. Para este fenómeno aún no se tiene una explicación concreta.

El campo magnético terrestre también influye en la incidencia de esta radiación, pues al estar compuesta de partículas eléctricamente cargadas, sufren una desviación al estar en presencia de dicho campo.

Cuando se está a alturas muy elevadas es más fácil tener mayor cantidad de radiación, pues las partículas cuyo tiempo de vida es muy pequeño no han decaído, el no atravesar el volumen total de materia que implica llegar hasta la superficie les evita la pérdida de energía, porque la interacción con esa materia es menor. Por el contrario, cuando se está a nivel del mar, la incidencia es muy pobre, a causa de los factores descritos con anterioridad.



**Figura 2.1** Distribución angular del flujo integral de muones producidos en la atmósfera a la altura de la Ciudad de México, tomada de la referencia [13]. Donde la curva representa el ajuste propuesto a los datos adquiridos.

Cabe mencionar que la dirección en que inciden tanto los muones como el resto de radiación cósmica a nuestro planeta obedece a cierta distribución. Es más frecuente la incidencia perpendicular a la superficie terrestre que la incidencia de radiación a otros ángulos. Por ejemplo, la frecuencia de partículas que inciden de manera casi paralela a la superficie es muy pobre. Esto se debe principalmente a la cantidad de materia en la atmósfera que atraviesan, aunado a una probabilidad mayor de decaimiento [8].

A manera de ejemplo, podemos mencionar los resultados obtenidos [13] en relación con la distribución angular del flujo integral de muones producidos en la atmósfera, realizada con un detector tipo telescopio con una aceptación angular de 8 grados y precisión de 0.5 grados en su posicionamiento. Los resultados reportados (Fig. 2.1) corresponden a medidas realizadas entre octubre y diciembre de 2003 en la Ciudad de México, a una latitud geográfica de 19° Norte, latitud geomagnética de 29° Norte, longitud 99° Oeste y a 2400 m sobre el nivel del mar. En dicha gráfica puede observarse el ajuste tipo coseno propuesto para la distribución en función del ángulo azimutal, cuya curva reproduce el comportamiento citado dentro del intervalo de valores  $0^\circ < \theta < 70^\circ$ .

## 2.2 Interacción de muones con materia

La radiación cósmica de tipo secundaria que será estudiada por el sistema de detección propuesto está conformada por muones, cuyas características generales han sido explicadas con anterioridad. Este tipo de partículas, desde el momento de su creación, viajan a través de la atmósfera antes de arribar a la superficie e interactuar con diversos tipos de materiales. Los muones atmosféricos que nosotros estudiaremos pierden energía a través de su paso por la materia principalmente por procesos de ionización, aunque existen otros mecanismos como el *bremstrahlung* y la producción de pares, que también contribuyen en menor medida a la pérdida energética [8].

### 2.2.1 Ionización y excitación

De acuerdo a la ecuación de Bethe-Bloch, la pérdida de energía,  $dE/dx$ , debida a ionización y excitación atómica para una partícula cargada relativista atravesando la atmósfera en dirección vertical es de 2.2 GeV.

Para dichas partículas, la razón de pérdida energética por ionización varía logarítmicamente con la energía.

Para una partícula relativista con carga  $ze$  en un material con número atómico  $Z$  y masa atómica  $A$ , la ecuación de Bethe-Bloch puede escribirse como:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \dots (2.1)$$

donde  $m_e$  es la masa en reposo del electrón,  $r_e$  es el radio clásico del electrón,  $N_A$  es el número de Avogadro y  $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071 \text{ MeVcm}^2\text{g}^{-1}$ . Donde  $\gamma$  es el factor de Lorentz y  $\beta = v/c$ . Mientras que  $I$  es la constante de ionización y está dada de manera aproximada por  $16Z^{0.9} \text{ eV}$  para  $Z > 1$ , y  $dx$  es el espesor o "columna de densidad" expresada como masa por unidad de área. Y finalmente,  $\delta$  representa el "efecto de densidad" que se aproxima a  $2\ln\gamma$  más una constante para partículas muy energéticas.

La interacción de partículas cargadas con materia también da lugar a dispersiones tipo Coulomb. La cual se debe a múltiples y pequeñas interacciones que provocan una desviación angular, que de manera aproximada obedece a una distribución gaussiana de la forma:

$$\frac{dN}{d\theta_x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} e^{-\frac{\theta_x^2}{2\theta_0^2}} \dots (2.2)$$

donde la anchura  $\theta_0$ , se relaciona con el material dispersor a través de su longitud de radiación  $L_0^*$ , mediante la ecuación:

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{L_0} [1 + 0.038 \ln(L/L_0)]} \dots (2.3)$$

donde  $p$  es el momento de la partícula en  $\text{MeVc}^{-1}$  y  $\beta c$  su velocidad [11]. La longitud de radiación decrece rápidamente cuando el número atómico del material se incrementa, mientras que  $\theta_0$  crece. Por ejemplo, para un espesor de 10 cm, un muón de 3 GeV se desvía con un ángulo de 2.3 miliradianes en agua, 11 miliradianes en hierro y 20 miliradianes en plomo.

## 2.2.2 Bremsstrahlung y producción de pares

Para energías mayores, las partículas cargadas experimentan otros procesos de pérdida de energía por *bremsstrahlung* (*bs*), *producción de pares* (*pp*), e *interacciones nucleares* (*in*) debidas a procesos foto-nucleares. La pérdida de

\* Distancia necesaria para reducir la energía de una partícula a 1/e de su valor original.

energía radiativa crece de manera proporcional con la energía. La expresión correspondiente para la pérdida de energía  $dE$  [eV], por unidad de espesor,  $dx$  [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ], incluyendo la ionización, tiene la forma:

$$\frac{dE}{dx} = a_{ion}(E) + b(E)E \quad [\text{eVg}^{-1}\text{cm}^2] \quad \dots (2.4)$$

donde  $a_{ion}(E)$  representa las pérdidas por ionización mencionadas y

$$b(E) = b_{bs}(E) + b_{pp}(E) + b_{in}(E) \quad \dots (2.5)$$

constituye las contribuciones de los demás procesos. Cabe mencionar que todos los términos son dependientes de la energía.

La energía a la cual la pérdida energética debida a ionización y bremsstrahlung se iguala es frecuentemente llamada la “energía crítica”  $E_c$ . Por encima de dicha energía los procesos de tipo radiativo comienzan a dominar. Para muones esta energía es  $E_c \approx 3.6 \text{ TeV}$ .

## Capítulo 3

# Principios de operación en centelleadores y cámaras multialámbricas

### 3.1 Principios de detección en centelleadores plásticos

La detección de radiación ionizante a través de los destellos luminosos producidos en ciertos materiales es una de las técnicas más antiguas para registrar y estudiar interacciones en distintos medios. El proceso de fluorescencia es la emisión rápida de radiación visible por una sustancia, precedida por una excitación a través de algún mecanismo específico. Existen varios procesos que también presentan la emisión de luz visible, aunque cada uno posee características particulares. La fosforescencia, por ejemplo, corresponde a la emisión de luz cuya longitud de onda es mayor que en la fluorescencia, y con un tiempo característico que es generalmente mucho mayor. La fluorescencia retardada presenta el mismo espectro de emisión que la fluorescencia rápida, pero ésta se caracteriza por un tiempo de emisión más largo seguido de la excitación. Para ser un buen centelleador, un material debe convertir la fracción más grande posible de energía de la radiación incidente en fluorescencia rápida, minimizando de esta forma las contribuciones espurias de la fosforescencia y fluorescencia retardada [14]. El proceso de centelleo sigue siendo uno de los métodos más usados para la detección y espectroscopia de una amplia variedad de radiaciones.

Un material centelleador ideal debería poseer las siguientes propiedades:

- Convertir la energía cinética de las partículas cargadas en luz detectable con una alta eficiencia de centelleo.
- Esta conversión debería ser lineal, es decir, la producción de luz debería ser proporcional a la energía depositada dentro de un amplio intervalo de energía.
- El medio debería ser transparente a la longitud de onda de su propia emisión, teniendo así una buena transmisión de luz.
- El tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida debería ser pequeño para permitir la generación de pulsos de señales rápidas.
- El material debe presentar una buena calidad óptica y tener la propiedad de ser producido en dimensiones de gran escala (del orden de metros).

- Su índice de refracción debería ser muy similar al del vidrio (~1.5) para permitir un acoplamiento eficiente de la luz del centelleador respecto al tubo fotomultiplicador [14].

Por desgracia, ningún detector de centelleo cumple simultáneamente con todos los requisitos, y la elección de un centelleador en particular es casi siempre un compromiso entre estos y muchos otros factores. Los centelleadores usados más comúnmente incluyen a los cristales halogenuros alcalinos, entre los que se encuentra el Yoduro de Sodio dopado con Talio - NaI(Tl) -. Así mismo, los detectores de centelleo orgánicos, líquidos o plásticos también son muy populares. Los centelleadores inorgánicos suelen tener el mejor rendimiento luminoso al igual que linealidad, aunque con algunas excepciones son relativamente lentos en su respuesta temporal [15].

Por otra parte, los detectores de centelleo orgánicos son generalmente más rápidos pero presentan menor luminosidad [16]. El alto número atómico de los elementos que componen a los cristales inorgánicos y su alta densidad, los hace propicios para espectroscopia de radiación gamma, mientras que los cristales orgánicos son frecuentemente utilizados para espectroscopia de radiación beta y detección de neutrones rápidos.

Si un centelleador orgánico es disuelto con otros materiales en un disolvente, los cuales pueden ser posteriormente polimerizados, el resultado de dicha solución sólida es un plástico centelleador. El ejemplo más común es un disolvente a base de un monómero de estireno en el cual se disuelve un centelleador orgánico. El estireno es entonces polimerizado para formar un plástico sólido.

La mayoría de los materiales centelleadores están formados por anillos compuestos de benceno orgánico ( $C_6H_6$ ). Existen otros materiales inorgánicos que presentan propiedades de centelleo, como el sulfuro de Zinc y las pantallas de cianuro de Platino que se mezclan con plástico. Sin embargo, esos materiales son generalmente opacos y presentan una baja eficiencia de centelleo (dada la mezcla citada).

Consideremos ahora los compuestos de benceno, los cuales aportan la propiedad de centelleador al material en cuestión. En la configuración normal de la molécula de benceno (con estructura de anillo) los átomos de Carbono son tetravalentes y la valencia de los electrones orbitales se divide en dos clases. La primera está formada por orbitales  $\sigma$  (sigma), que se localizan en los enlaces entre el átomo de Carbono, su átomo de Hidrógeno asociado y los átomos de Carbono adyacentes en el anillo. El electrón orbital de valencia cuatro no tiene una posición fija ni estable y forma el doble enlace adicional con el electrón orbital correspondiente de valencia cuatro con cualquiera de

los dos átomos de Carbono vecinos. Esos electrones son los que se conocen como orbitales  $\pi$  (pi).

Electrones orbitales  $\pi$  similares pueden encontrarse en otras moléculas conjugadas aparte de las existentes en el benceno, donde los estados excitados de tales electrones son responsables de la luminiscencia de dichas moléculas.

El grupo más importante de compuestos integrados por electrones orbitales  $\pi$  son los centelleadores orgánicos llamados hidrocarburos cata-condensados [17], los cuales son hidrocarburos policíclicos formados por sistemas condensados de anillos de benceno en los que ningún átomo de Carbono pertenece a más de dos anillos [18].

Estos hidrocarburos policíclicos se dividen en dos grupos. El primero incluye a los hidrocarburos cata-condensados de estructura *lineal*, como la naftalina y el antraceno, que forman cadenas lineales de anillos de benceno condensados. Mientras que al segundo grupo pertenecen los hidrocarburos cata-condensados de estructura *policíclica*, que son anillos de benceno condensados en forma de placas como el poliestireno [17].

Dada la facilidad con la cual pueden moldearse y fabricar, los plásticos se han convertido en una opción extremadamente útil dentro de los centelleadores orgánicos. Existe una amplia gama de modelos a nivel comercial, incluyendo centelleadores especiales para tiempos rápidos de decaimiento, así como para propósitos de discriminación por forma de pulso.

Los centelleadores plásticos son fabricados en distintos tamaños y formas, siendo estas últimas tan variadas como varillas, cilindros y placas delgadas. Ya que el material no es tan costoso (en comparación con otros detectores), los plásticos son a menudo la única opción práctica en caso de utilizarse centelleadores sólidos de gran volumen. En estos casos la autoabsorción de la luz del centelleador no es despreciable, y deben considerarse las propiedades de atenuación del material. La distancia a la cual la intensidad de luz se atenúa por un factor de 2 puede ser de varios metros [14], aunque longitudes de atenuación mucho más pequeñas han sido registradas para algunos plásticos [19].

Existen otras variables a considerar, cuando de transmisión de luz en el plástico se trata. Estas se relacionan con los fenómenos ópticos que ocurren durante y después de la emisión fotónica en el detector centelleador.

Una vez que la luz es emitida por el plástico, ésta toma todas las direcciones posibles cubriendo de este modo un ángulo completo (en las 3 dimensiones espaciales) de  $4\pi$  respecto al punto donde se produjo la luminiscencia en el detector. A partir de este instante los distintos trayectos

del haz luminoso experimentarán desviaciones provocadas por la reflexión interna y refracción ocurrida dentro del plástico centelleador.

La reflexión de la luz dentro del detector (reflexión interna) tendrá un límite dado por el ángulo crítico; toda la luz que incida en las “paredes” o superficies internas con un ángulo de incidencia menor que el ángulo crítico, saldrá del plástico centelleador. Dicha dependencia de la reflexión respecto al ángulo crítico también involucra características superficiales del detector como el grado de pulimento y el terminado de los lados. La citada pérdida de luz se ve disminuida al cubrir el detector con materiales de color reflejante (por ejemplo blanco) abarcando la mayor área posible.

El paso de la luz del detector hacia la ventana del tubo fotomultiplicador implica un cambio entre dos medios con índices de refracción distintos. Una medida óptima para minimizar la diferencia de los citados índices consiste en intercalar un tercer medio con un índice de refracción cuyo valor sea intermedio entre los correspondientes al del detector y al de la ventana del tubo fotomultiplicador. Dicho requerimiento lo cumple precisamente la grasa óptica, la cual se usa como medio de contacto al acoplar el detector con el tubo fotomultiplicador, asegurando así una buena transmisión óptica.

En la unión antes descrita, aún existe la posibilidad de pérdida o escape de luz debido a la refracción experimentada por la misma al atravesar dos interfaces de medios distintos. El uso de cinta o pintura blanca alrededor de dichas uniones disminuye en buena medida la probabilidad de escape de luz durante su paso a través de tal sección. Cabe recordar que el paso de luz a través de dos medios distintos presentará una mínima reflexión intrínseca, existente en cualquier cambio entre interfaces de distinto material.

Al momento de adquirir las señales producidas en un centelleador, es común el uso de fibras corredoras de frecuencia, las cuales son generalmente barras hechas de materiales orgánicos sólidos (polímeros), que absorben luz de una longitud de onda y emiten fotones en una longitud de onda distinta. Esta característica las convierte en elementos colectores de luz muy útiles en distintos tipos de detectores. Existe un compromiso entre el máximo de absorción de la fibra, que debe coincidir con la emisión del centelleador, y la emisión de la misma, cuyo valor necesita estar dentro del intervalo de respuesta óptica de la ventana del tubo fotomultiplicador a utilizar.

### **3.1.1 Tubo Fotomultiplicador**

El gran uso de los contadores de centelleo en detección y espectroscopia de radiación, sería imposible sin la existencia de dispositivos capaces de

convertir la salida de luz extremadamente débil de un pulso de centelleo en una señal eléctrica correspondiente.

El tubo fotomultiplicador o PMT (*PhotoMultiplier Tube*) cumple eficientemente dicha tarea. Convierte las señales de luz, que normalmente son de unos cuantos cientos de fotones [14], en un pulso de corriente analizable sin presentar una cantidad de ruido que afecte el estudio de la señal. Existe una gran variedad de PMTs comerciales sensibles a energía radiante en regiones del ultravioleta, visible y cerca del infrarrojo dentro del espectro electromagnético [20].

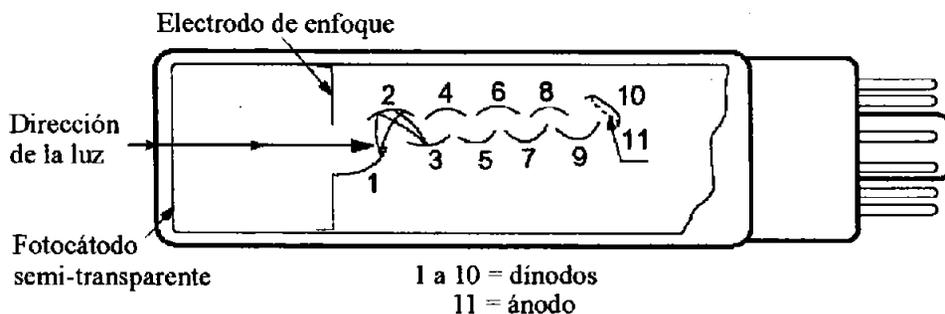
La primer tarea de un PMT consiste en la conversión de los fotones incidentes en electrones. Este proceso de fotoemisión ocurre en tres pasos consecutivos: (I) la absorción de los fotones incidentes y la transferencia de energía a un electrón dentro del material fotoemisor, (II) la migración de ese electrón a la superficie, y (III) el escape del electrón de la superficie del fotocátodo.

La sección multiplicadora de un PMT está basada en el fenómeno de emisión secundaria de electrones. Los electrones del fotocátodo son acelerados, provocando así que choquen en la superficie de un electrodo, llamado dínodo. En este último, la energía depositada por el electrón incidente provoca la reemisión de más de un electrón de esa misma superficie (ver Fig. 3.1).

Para conseguir la ganancia o multiplicación del número de electrones del orden de  $10^6$  o más, todos los PMT emplean varias etapas. Los electrones que salen del fotocátodo son atraídos por el primer dínodo y producen  $\delta$  electrones por cada fotoelectrón incidente. Los electrones secundarios que son producidos en la superficie del primer dínodo nuevamente tienen muy bajas energías, normalmente de unos cuantos eV (electrón-volts). Debido a ello, son guiados con bastante facilidad por otro campo electrostático establecido entre el primer dínodo y un segundo dínodo. Este proceso puede repetirse varias veces, con electrones secundarios de baja energía provenientes de cada dínodo que después son acelerados hacia el siguiente dínodo. Si  $N$  es el número de etapas existentes en la sección multiplicadora, la ganancia total del PMT está dada por:

$$\text{Ganancia Total} = \alpha \delta^N \quad \dots \dots (3.1)$$

donde  $\alpha$  es la fracción de todos los fotoelectrones colectados por la estructura multiplicadora. Los dínodos convencionales están caracterizados por un valor típico de  $\delta = 5$ , y  $\alpha$  es muy cercano a la unidad para la mayoría de los PMT comerciales. Diez etapas por ejemplo, darían una ganancia total de  $5^{10}$ , o equivalentemente  $10^7$ .



**Figura 3.1** Vista esquemática de la sección multiplicadora de un PMT.

El factor de multiplicación de electrones en un PMT permanece constante para pulsos que varían en tamaño desde el producido por un fotoelectrón, hasta el debido a varios miles de ellos. Bajo estas condiciones la amplitud del pulso colectado en el ánodo está relacionada linealmente con el número de fotoelectrones, y consecuentemente a la intensidad del destello producido por el centelleador. Casos de no-linealidad pueden presentarse en pulsos muy grandes debidos a efectos de carga espacial entre el último dínodo y el ánodo, donde el número de electrones es grande. La existencia del efecto de carga espacial afecta las trayectorias de los electrones en esta región y provoca que muchos no sean colectados.

Los PMT necesitan conectarse a una fuente externa de voltaje, de tal manera que el fotocátodo y las etapas multiplicadoras siguientes presenten sus respectivas diferencias de potencial. Dado que los electrones deben ser atraídos, el primer dínodo debe permanecer a un voltaje positivo respecto del fotocátodo, y cada uno de los dínodos siguientes debe estar a un voltaje positivo respecto al dínodo anterior. Para una colección eficiente de fotoelectrones, el voltaje entre el fotocátodo y el primer dínodo es por lo regular varias veces más grande que las diferencias de voltaje entre dínodos.

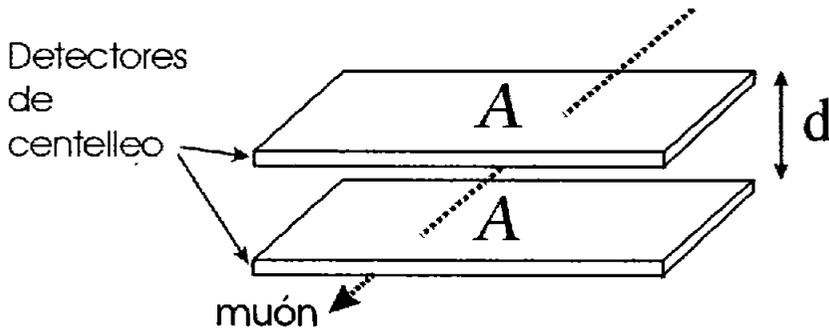
En la gran mayoría de los casos, las diferencias de voltaje se implementan mediante un divisor de voltaje (que consiste de un arreglo de resistencias colocadas en serie) y una fuente de alto voltaje.

A nivel comercial existen divisores de voltaje sellados [20]. Dichos dispositivos son acoplados al PMT, teniendo así el sistema contador de centelleo completo. En la mayoría de los casos la entrada de la base se alimenta con el alto voltaje, mientras que en la salida se obtiene la señal proveniente del PMT.

### 3.1.2 Detección de muones con centelleadores

La radiación de origen cósmico descrita en el segundo capítulo, es comúnmente detectada con centelleadores, dadas sus propiedades físicas y su disponibilidad a nivel comercial en distintas formas sólidas o líquidas [8]. A continuación expondremos de manera general los principios de detección de muones con centelleadores plásticos, debido a la conveniencia experimental de su utilización dentro de este proyecto.

Al colocar un par de detectores de centelleo, como se muestra en la figura 3.2, con sus respectivos sistemas fotomultiplicadores acoplados, los pulsos emitidos por el paso de muones se analizan generalmente con electrónica modular, capaz de analizar señales rápidas con tiempos de formación o *rise time* de unos cuantos nanosegundos.



**Figura 3.2** Esquema de la configuración utilizada con centelleadores para la detección de muones.

La condición instrumental necesaria para detectar muones es la coincidencia de eventos generados en ambos plásticos centelleadores debido a la incidencia y paso de radiación cósmica a través de ellos. Esta condición de coincidencia es necesaria para descartar la interacción de fenómenos de naturaleza espuria en los detectores.

Dicho sistema es sensible a la radiación de fondo del medio, sin embargo, esta radiación no es capaz de generar dos señales en coincidencia en los centelleadores, quienes por lo regular cuando se trata de plásticos centelleadores, tienen espesores de un par de centímetros. A diferencia de los muones, cuya energía mínima de unos cuantos GeV es suficiente para atravesar dicha cantidad de material y generar señales coincidentes. Los eventos de naturaleza errática provocados por descargas o fluctuaciones

eléctricas en cada sistema de fotomultiplicación también son descartados al imponer la condición de coincidencia, registrando así en su gran mayoría la interacción de radiación cósmica en los detectores.

Para cuantificar la incidencia de muones durante un intervalo de tiempo en un sistema de detección de esta naturaleza, es común utilizar la expresión del flujo  $\phi$ , la cual depende de las siguientes variables:

$$\phi = \frac{Cd^2}{A_1 A_2} \quad \dots \quad (3.2)$$

donde  $C$  es el número de cuentas por minuto,  $d$  es la distancia entre los centelleadores,  $A_1$  y  $A_2$  son las áreas de cada detector. Las unidades en que se expresa  $\phi$  son [cts/min/cm<sup>2</sup>/sterad]\*, magnitud que permite conocer el flujo de muones independientemente de las dimensiones o geometría de los detectores involucrados [8].

Un elemento fundamental con el que se debe contar para estas mediciones es un módulo electrónico capaz de discriminar las señales amplificadas provenientes de los tubos fotomultiplicadores, limpiando de manera gradual todos aquellos eventos espurios asociados. Al instrumentar un equipo de detección, puede iniciarse por comprobar que al menos el sistema detecta del orden de una cuenta por centímetro cuadrado por minuto, al tener los detectores en posición horizontal [8]. Estas mediciones se repiten colocando el sistema con un ángulo de inclinación de 45°, posición en la cual se obtiene un conteo aproximado del 50% respecto a la anterior [13]. Una vez calibrado el equipo en base a mediciones y a los registros existentes en la literatura [8], es recomendable realizar conteos por intervalos temporales que cubran por lo menos un día completo. Por ejemplo, en un laboratorio del Instituto de Física localizado en Ciudad Universitaria donde se realizó un conteo de radiación cósmica por un periodo de 24 horas,  $\phi = 0.65$  cts/min/cm<sup>2</sup>/sterad.

### 3.2 Principios de detección en cámaras multialámbricas

La primer cámara proporcional multialámbrica, en su concepción moderna, fue construida y operada por Charpak y sus colaboradores en el año de 1967 [21]. Casi de inmediato, fueron reconocidas las principales características de una cámara proporcional multialámbrica (MWPC por sus siglas en inglés),

---

\* El flujo, en este caso, se define como el conteo de partículas (cts), por minuto, por unidad de área, por unidad de ángulo sólido (sterad).

e.g. buena resolución en tiempo, posición y muy útil para su uso en experimentos de física de altas energías. Hoy en día, son varios los arreglos de detección rápidos que cuentan con un gran número de MWPC's, y su uso se ha extendido a distintas disciplinas como la astronomía, medicina nuclear, cristalografía de proteínas e investigaciones relacionadas con la detección de rayos cósmicos. En muchos aspectos, sin embargo, las MWPC's son arreglos experimentales cuya operación requiere de continua atención y cuidados extremos, algunas veces como protección contra los cambios imprevistos en las condiciones del medio que las circundan. Además, en el diseño, fabricación y operación de una cámara, la gente involucrada acostumbra emplear una mezcla de conocimientos, habilidades técnicas y un gran compendio de "recetas" adquiridas de manera empírica, que caracterizan a cada detector en particular [5].

### 3.2.1 Detección de partículas cargadas

Una partícula cargada rápida, atravesando un medio gaseoso o condensado, puede interactuar con él de distintas formas. De todas las posibles interacciones, sin embargo, sólo la electromagnética es generalmente la responsable del proceso de detección en este caso, siendo varios órdenes de magnitud más probable que las interacciones debidas a la fuerza nuclear fuerte o débil. La mayor contribución es debida a interacciones tipo Coulomb entre los campos electromagnéticos de las partículas cargadas incidentes y los del medio, lo que resulta en una excitación, así como una ionización de los átomos que conforman al medio. La contribución de otros procesos electromagnéticos (al menos para partículas más pesadas que los electrones), tales como *bremstrahlung*, Cherenkov y transiciones radiativas son despreciables en detectores gaseosos, por lo que serán omitidos.

Existe una expresión para el promedio de la pérdida energética debida a interacciones de Coulomb dada por Bethe-Bloch [22], la cual se mostró con anterioridad en la ecuación (2.1), y donde intervienen valores del material como su número y masa atómica, además de la masa en reposo y radio clásico del electrón, entre otros datos.

A la cantidad que representa la máxima transferencia de energía permitida en cada interacción, entre una partícula incidente pesada y un electrón del medio, se le conoce como  $E_M$ , que en el caso de cinemática relativista de dos cuerpos [23] da como resultado:

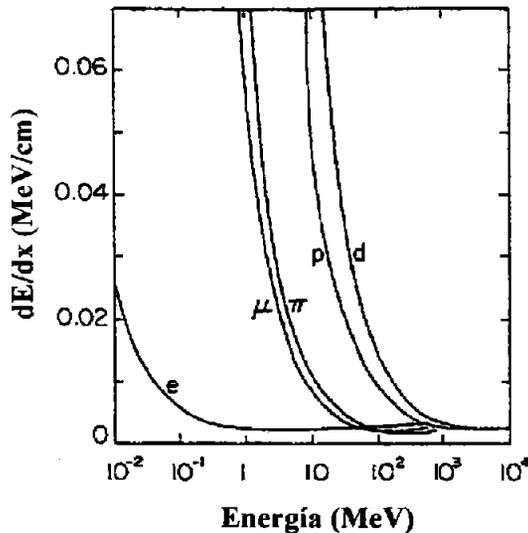
$$E_M = \frac{2mc^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \quad \dots \quad (3.3)$$

Por ejemplo, para protones de 1 GeV/c ( $\beta=0.73$ ),  $E_M=1.2$  MeV. Tratándose de pérdidas de energía, es frecuente sustituir la longitud  $X$  por el espesor másico  $x$  definido como  $X\rho$  y con unidades de  $\text{g cm}^{-2}$ . En este caso, la pérdida de energía reducida puede escribirse como:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dX} \quad \dots \quad (3.4)$$

El valor del potencial de ionización efectivo  $I$ , que aparece en la ecuación 2.1, es en general el resultado de una medición para cada material; una aproximación es  $I = I_0 Z$  con  $I_0=12$  eV [5].

Una inspección a la expresión (2.1) muestra que la pérdida energética depende sólo de la velocidad del proyectil  $\beta$ , y no de su masa. Después de una rápida disminución dominada por el término  $\beta^{-2}$ , la pérdida energética se detiene en un valor constante cerca de  $\beta \cong 0.97$  y eventualmente se incrementa  $\beta \rightarrow 1$  (aumento relativista). La región de pérdida constante es llamada la región de mínima ionización y corresponde al caso más frecuente en física de altas energías.



**Figura 3.3** Pérdida energética por unidad de longitud en aire, calculado a partir de la expresión (1.1), para diferentes partículas como función de su energía. Para energías mayores a 1 GeV/c, todas las partículas pierden casi la misma cantidad de energía (meseta de mínima ionización) [5].

Cuando se grafica  $dE/dX$  como función de la energía del proyectil (Fig. 3.3), se observa que para energías mayores a unos cientos de MeV todas las partículas están en el mínimo de ionización y debido a ello pierden la misma cantidad de energía por unidad de longitud; para la mayoría de los materiales,  $dE/dx \approx 2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$  en el mínimo.

Cabe señalar que, aún para materiales delgados, la pérdida energética electromagnética es el resultado de un pequeño número de interacciones discretas y, por lo tanto, tiene las características de un promedio estadístico. La distribución, sin embargo, no es Gaussiana para todos los casos donde la pérdida energética  $\Delta E$  es pequeña comparada con la energía total. Además, a un nivel más detallado, el mecanismo de interacción muestra que los eventos individuales pueden agruparse en dos clases: colisiones cercanas, con grandes transferencias de energía resultantes en la liberación de cargas electrónicas (ionización), y colisiones distantes que involucran transferencias de energía más pequeñas que dan como resultado tanto ionizaciones como excitaciones de tipo atómico.

El sistema de detección presentado en esta tesis, fue planeado para detectar muones mínimo-ionizantes o *MIP's* (*Minimum Ionizing Particles*). Esta característica también la comparten ciertas partículas emitidas por fuentes radiactivas. Tal es el caso de las partículas  $\beta$  (electrones) emitidas por el  $^{90}\text{Sr}$  con energías máximas de 2.27 MeV y las cuales fueron utilizadas durante varias etapas experimentales y de calibración para las cámaras multialámbricas.

### 3.2.2 Producción de rayos $\delta$

En colisiones que producen ionizaciones, el electrón expulsado es liberado con una energía  $E$  que puede tomar cualquier valor, teniendo como cota superior el valor máximo permitido  $E_M$ , como se muestra en la ecuación (3.3). Una expresión aproximada para calcular la probabilidad de que un electrón reciba una energía  $E$  está dada por [22]:

$$P(E) = \frac{KZ\rho X}{A\beta^2 E^2} \quad \dots \quad (3.5)$$

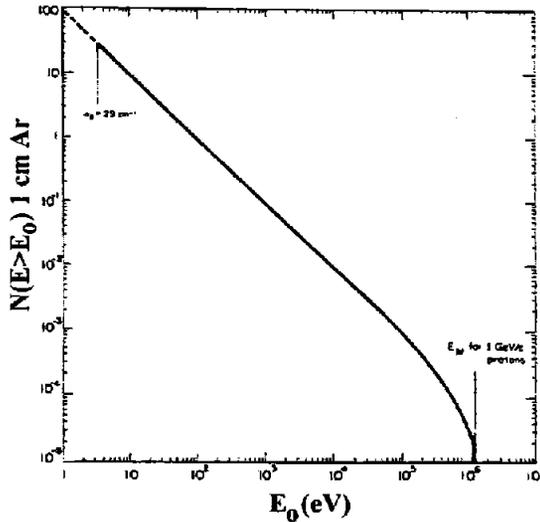
que corresponde esencialmente al primer término en la ecuación de Bethe-Bloch. Expresiones más detalladas pueden hallarse en la literatura correspondiente [24], pero para nuestro propósito la aproximación (3.5) es suficiente. Si introducimos el espesor reducido  $x = X\rho$ , dado en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , la expresión puede reescribirse en la forma:

$$P(E)dE = \frac{KZx}{\beta^2 AE^2} dE = W \frac{dE}{E^2} \quad \dots \quad (3.6)$$

donde  $W$  representa la contribución energética de las partículas eyectadas. Los electrones expulsados con una energía superior a unos cuantos keV son frecuentemente llamados rayos  $\delta$ . Integrando la expresión (3.6) obtenemos una ecuación para el número de electrones  $\delta$  con energía  $E_0$  o mayor:

$$N(E \geq E_0) = \int_{E_0}^{E_M} P(E)dE = W \left\{ \frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_M} \right\} \cong \frac{W}{E_0} \quad \dots \quad (3.7)$$

donde la última aproximación es válida para  $E_0 \ll E_M$ . A manera de ejemplo, la figura 3.4 muestra el número de electrones expulsados con energía  $E \geq E_0$  por protones de 1 GeV/c, como función de  $E_0$  en 1 cm de Argón y condiciones normales.



**Figura 3.4** Número de electrones  $\delta$  expulsados a una energía mayor o igual que  $E_0$ , como función de  $E_0$ , en 1 cm de Argón. Se muestran el promedio de colisiones ionizantes primarias (29 / cm) y la máxima transferencia de energía permitida a 1 GeV/c para protones [5].

El ángulo de emisión de un electrón  $\delta$  de energía  $E$  está dado por la aproximación de electrón libre [24]:

$$\text{Cos}^2 \theta = \frac{E}{E_M} \quad \dots \quad (3.8)$$

Por lo que, para partículas de mínima ionización, y energías de emisión de varios keV, los rayos  $\delta$  son emitidos perpendicularmente respecto a su trayectoria incidente; sin embargo, dispersiones múltiples en el medio contribuyen a promediar la dirección de movimiento de los electrones  $\delta$ . De hecho, la sección transversal típica del electrón, en la región de keV, es aproximadamente de  $10^{-16} \text{ cm}^2$ , a presión atmosférica, lo que corresponde al camino libre medio entre colisiones de unos cuantos micrones. Para energías de cientos de electron-volts, la sección transversal aumenta un orden de magnitud debido a la alta probabilidad de colisiones inelásticas.

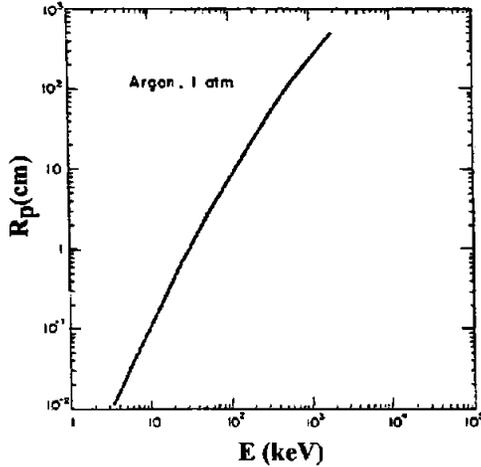
### 3.2.3 Alcance de electrones lentos

Dependiendo de su energía, los electrones  $\delta$  pueden recorrer cierta distancia en el gas, experimentando colisiones elásticas e inelásticas con las moléculas. El alcance total  $R_T$  para una energía  $E$  medida a lo largo de la trayectoria, puede calcularse integrando la ecuación de Bethe-Bloch sobre la distancia  $R_T$  e igualando la integral al valor de la energía total disponible; sin embargo, esto da como resultado una mala aproximación para la distancia efectiva recorrida por un electrón, debido al efecto promedio final de las colisiones múltiples. Es frecuente definir un alcance práctico  $R_p$  que suele ser dos o tres veces menor que el alcance total y en general es el resultado de una medida de absorción [5]. Para energías de unos cientos de keV, una mejor aproximación para el alcance práctico, en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , es:

$$R_p = 0.71 E^{1.72}, \quad (E \text{ en MeV}) \quad \dots \quad (3.9)$$

La figura 3.5 muestra el alcance de electrones en Argón, bajo condiciones normales, como función de la energía. Combinando la información de las gráficas 3.4 y 3.5 uno puede deducir, por ejemplo, que en 1 cm de Argón, una de cada 20 partículas de mínima ionización expulsa un electrón de 3 keV con un alcance de 100  $\mu\text{m}$ .

Dado que la pérdida energética promedio en Argón es 2.5 keV/cm, dichos eventos resultarán en un pulso de mucha mayor amplitud, y también el centro de gravedad de la carga detectada, que es la mejor información de la posición que uno puede obtener, será sistemáticamente desplazada hacia un lado de la trayectoria original. Esto obviamente fija un límite para la mejor resolución en posición que uno puede esperar obtener en un contador de gas operando a presión atmosférica.



**Figura 3.5** Alcance de electrones en Argón, bajo condiciones normales como función de la energía, deducida de mediciones en materiales ligeros [24].

### 3.2.4 Ionización primaria y total

Durante el paso de la partícula por el material, un número discreto de colisiones ionizantes primarias ocurren, las cuales liberan pares electrón-ion en el medio. El electrón expulsado puede tener la suficiente energía (mayor que el potencial de ionización del medio) para producir más ionizaciones, produciendo pares iónicos secundarios; la suma de estas dos contribuciones es lo que se llama ionización total. Ambas, la ionización primaria y total, han sido medidas para una gran cantidad de gases, aunque no siempre en la región de mínima ionización. El número total de pares iónicos puede expresarse convenientemente por:

$$n_T = \frac{\Delta E}{W_i} \quad \dots (3.10)$$

donde  $\Delta E$  es la pérdida total de energía en el volumen de gas considerado, y  $W_i$  es la energía promedio efectiva para producir un par.

Para el caso de mezclas de gas, puede usarse una relación simple. A manera de ejemplo, calculemos el número de pares iónicos primarios ( $n_p$ ) y totales ( $n_T$ ) producidos en 1 cm de gas argón-isobutano ( $\text{Ar-C}_4\text{H}_{10}$ , 70-30) bajo condiciones normales, considerando para el argón  $W_i = 26$  eV,  $dE/dx =$

2440 eV/cm y  $n_p = 29.4$  p.i./cm, mientras que para el isobutano  $W_i = 23$  eV,  $dE/dx = 4500$  eV/cm y  $n_p = 46$  p.i./cm [5]:

$$n_T = (2440/26)0.7 + (4500/23)0.3 = 124 \text{ pares/cm}$$

$$n_p = (29.4)(0.7) + (46)(0.3) = 34 \text{ pares/cm}$$

En otras palabras, vemos que la distancia promedio entre interacciones primarias es alrededor de 300  $\mu\text{m}$  bajo condiciones normales, y que cada par primario produce aproximadamente 2.5 pares secundarios en promedio [5].

### 3.2.5 Ionización y excitación debido a pares secundarios

Si los electrones secundarios tienen suficiente energía, no sólo podrán excitar las moléculas del gas, sino que inclusive podrán ionizarlas generando nuevos pares ion-electrón, los cuales también serán acelerados y así sucesivamente, hasta lograr una reacción en cadena que terminará en una avalancha de cargas. Este proceso de multiplicación es la base del funcionamiento de los contadores proporcionales.

Consideremos un electrón libre con suficiente energía como para producir una ionización en el gas, en promedio, éste recorrerá un camino libre medio antes de lograr ionizar a una molécula del gas. Si definimos como  $\alpha$  ( $=1/\lambda$ )\* a ese camino libre medio y si tenemos  $n_0$  electrones, cada uno en una posición inicial dada, se espera que después que recorran una distancia  $dx$ , el número de electrones se habrá incrementado en:

$$dn = n\alpha dx \quad \dots (3.11)$$

integrando dicha ecuación tenemos,

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(\int \alpha dx\right) \quad \dots (3.12)$$

Se define entonces a la cantidad  $M = (n / n_0)$ , como el factor de multiplicación o ganancia.

Como se observa en la ecuación anterior,  $M$  es una función de  $\alpha$ , la cual en general dependerá del campo eléctrico, por lo que la expresión anterior la podemos escribir como,

$$M = \exp\left(\int \alpha(E) \frac{\partial x}{\partial E} dE\right) \quad \dots (3.13)$$

Si conocemos la dependencia de  $\alpha$  con  $E$ , entonces se puede integrar la expresión anterior para encontrar el valor de  $M$ .

Es importante recordar que  $M$  no puede crecer indefinidamente, ya que en un momento dado, al crearse una avalancha demasiado grande, ésta se

---

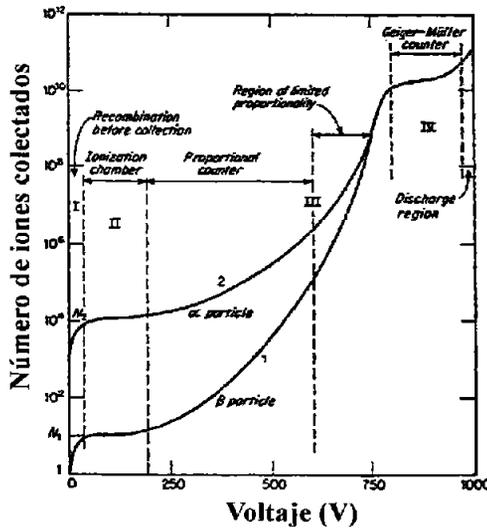
\* Donde  $\lambda$  representa el camino libre medio para la ionización secundaria.

puede salir de control y provocar descargas continuas de carga (chispas, como en un contador Geiger). Esto no es conveniente porque, aunque se pudiera saber que un evento de ionización ha sucedido, no se podría obtener mayor información sobre las características de la radiación que le dio origen. Ya que la ionización total está relacionada con la energía perdida en el gas, cantidad de cargas en movimiento que debe de ser proporcional (o semi-proporcional) a la energía que perdió la partícula en el gas.

Experimentalmente se ha encontrado [5] que para valores de  $M \sim 10^8$  las condiciones se vuelven sumamente inestables y la aparición de chispas es frecuente.

### 3.2.6 Detectores gaseosos

En las últimas secciones se han explicado los procesos principales por los que se pueden producir ionizaciones en gases. Dependiendo del factor de multiplicación  $M$ , podemos clasificar la operación de los contadores gaseosos en: cámaras de ionización ( $M \sim 1$ ), contador proporcional ( $M \leq 10^6$ ), contador semi-proporcional ( $10^6 < M \leq 10^8$ ) y contador Geiger ( $M \geq 10^8$ ) (Fig. 3.6)



**Figura 3.6** Carga colectada contra voltaje de operación, donde se aprecian las diferentes regiones en que puede operar un contador gaseoso. Recombinación (I), Cámara de ionización (II), Contador proporcional (III) y Contador Geiger (IV). Tomada de la referencia [5].

donde principalmente el valor del campo eléctrico reducido ( $E/P$ ) es lo que determina el modo de funcionamiento.

La figura 3.6 muestra la dependencia de la carga detectada en función de la diferencia de potencial  $V_o$  aplicada entre ánodo y cátodo. A altos voltajes ( $\sim 100$  V), las cargas comienzan a ser colectadas aún cuando la recombinación es el proceso dominante; después, el proceso de colección completa se inicia y el detector se dice que opera en el modo de cámara de ionización. A un cierto voltaje, llamado voltaje umbral  $V_T$ , el campo eléctrico cercano a la superficie del ánodo es suficientemente alto para dar paso al proceso de multiplicación. Al incrementar el valor de  $V_o$  por encima de  $V_T$ , puede obtenerse una ganancia aproximada de  $10^4$ , siendo todavía la carga detectada proporcional, a través del factor de multiplicación  $M$ , respecto a la carga depositada originalmente.

Para voltajes mayores, sin embargo, esta proporcionalidad se pierde gradualmente como consecuencia de las distorsiones del campo eléctrico, debidas a las grandes cargas espaciales creadas alrededor del ánodo. Esta región de proporcionalidad limitada eventualmente se convierte en una zona de ganancia saturada, donde la misma señal es detectada independientemente del evento ionizante original. Al aumentar el voltaje, los procesos de emisión de fotones provocan avalanchas en el contador, y el ánodo es completamente rodeado por iones y electrones: este es el modo de operación tipo Geiger-Muller.

En particular, cuando se trabaja con detectores multialámbricos en la región proporcional, uno de los primeros registros que deben obtenerse a manera de caracterización, es la curva de respuesta asociada. Este comportamiento gráfico que muestra el aumento de la señal de voltaje preamplificada obtenida desde el detector, y cuantificada por ejemplo en el osciloscopio, al incrementar de manera discreta el alto voltaje aplicado a los cátodos muestra el intervalo de operación desde el punto donde el sistema comienza a detectar la radiación incidente, pasando por una región de respuesta lineal, hasta llegar a una “meseta” de saturación donde generalmente un aumento de alto voltaje no produce aumento significativo en la señal estudiada, zona en la cual el conjunto ánodo-cátodos puede sufrir daños significativos debido a descargas eléctricas inducidas.

Como primer caso se considera el sistema más sencillo donde el campo eléctrico es uniforme y posteriormente se procede a discutir el caso en que la geometría es más complicada. El sistema más simple tiene dos placas paralelas (*PPAC, Parallel Plate Avalanche Counter*) cuyo espacio es llenado con gas (Fig. 3.7). Al pasar por el gas, las partículas lo ionizan y los electrones son atraídos hacia el electrodo positivo (ánodo) y los iones hacia el electrodo negativo (cátodo). El campo eléctrico en este caso está dado por:

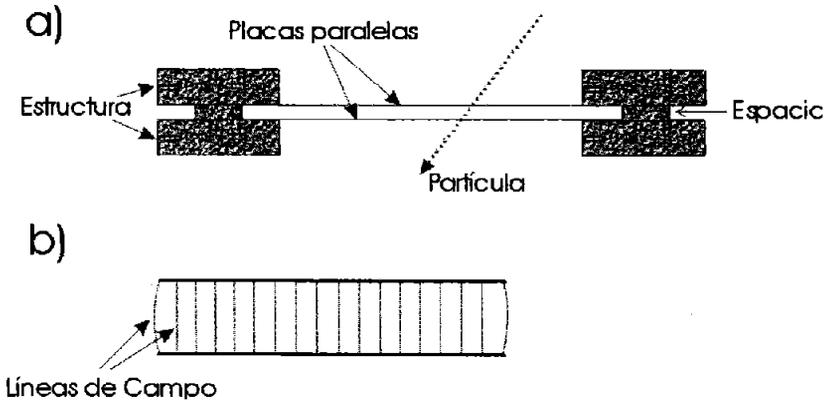
$$E = \frac{\Delta\phi}{\epsilon l} \quad \dots (3.14)$$

Con  $\epsilon$  la permitividad del gas,  $\Delta\phi$  diferencia de potencial entre los electrodos y  $l$  la separación entre ellos. Por lo tanto, debido a que el campo es uniforme en todos los puntos dentro de las placas, el factor de ganancia  $M$  está dado por:

$$M = e^{\alpha l} \quad \dots (3.15)$$

donde  $\alpha=1/\lambda$ , con  $\lambda$  representando el camino libre medio para la ionización secundaria.

Se observa que disminuir la distancia entre las placas implica un mayor valor de  $E$  y por ende de  $\alpha$ . Sin embargo, experimentalmente se ha encontrado [5] que sólo es factible alcanzar valores de campo reducido ( $E/P$ ) alrededor de 30 (V/cm torr) si la distancia entre las placas no es mayor a unos cuantos milímetros y la presión del gas es menor a la atmosférica ( $\approx 30$  torr).



**Figura 3.7** a) Sección transversal de un arreglo utilizado en un PPAC. b) Líneas de campo.

Una de las principales características para este arreglo es que, el proceso de multiplicación puede suceder en cualquier punto dentro del espacio entre el ánodo y el cátodo, ya que el valor del campo reducido es el mismo en cualquier punto.

Otra característica importante es que el tiempo que tardan las cargas en moverse de un electrodo al otro (tiempo de deriva), es corto ( $\approx 1.5$  ns), esto es debido a que la velocidad es relativamente alta ( $\approx 5 \times 10^9$  cm/s) [25].

Cuando los electrodos son fabricados con materiales ligeros y delgados (por ejemplo Mylar aluminizado), el PPAC muestra ser un contador muy conveniente. Especialmente cuando la identificación de partículas se realiza

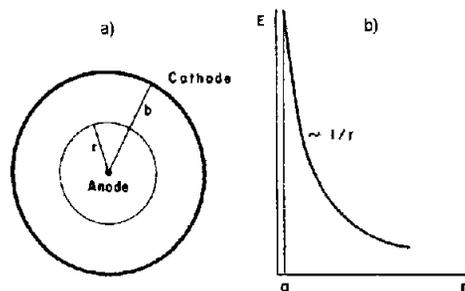
por medio de la técnica de tiempo de vuelo, ya que se pueden fabricar contadores de  $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  de espesor y con tiempo de formación de pulso de alrededor de 5 ns.

Ahora consideremos un sistema compuesto por un par de cilindros coaxiales, en donde el interno es un alambre rígido (*SWPC, Single Wire Proportional Counter*). Si se establece una diferencia de potencial  $\Delta\phi=V_0$  entre el cilindro y el alambre, el campo eléctrico y el potencial están dados por las siguientes expresiones:

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon r} \quad \dots (3.16)$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{a} \quad \dots (3.17)$$

donde  $C$  es la capacitancia del arreglo, que está dada por  $C=(2\pi\epsilon/\ln(b/a))$ , donde  $b$  es el radio del cilindro (cátodo) y  $a$  el radio del alambre (ánodo) (Fig. 3.8).



**Figura 3.8** a) Esquema del arreglo de cilindros coaxiales. B) Forma del campo eléctrico del sistema, las mayores intensidades se alcanzan alrededor de  $r=a$ .

Si el alambre es lo suficientemente delgado ( $\sim 0.01 \text{ cm}$ ), diferencias de potencial del orden de  $10^3 \text{ V}$  pueden generar intensidades de campo eléctrico de decenas de miles de  $\text{V}/\text{cm}$ , por lo que aún a presiones atmosféricas se alcanzan valores de campo reducido ( $\sim 30 \text{ V}/\text{cm torr}$ ) que da origen a avalanchas.

Este proceso tiene lugar primordialmente muy cerca de la superficie del alambre. Mientras la nube de electrones es multiplicada cerca del ánodo, los iones recorren casi toda la distancia entre el ánodo y el cátodo. Por lo tanto, la señal generada por el movimiento de las cargas, es en su mayor parte debida a los iones, que son los que tienen que cruzar por todo el arreglo. Esto implica que el tiempo en que se genera la señal es mayor que en el caso del PPAC. La

dependencia con el tiempo de dicha señal se puede obtener al considerar la velocidad de deriva  $v$ :

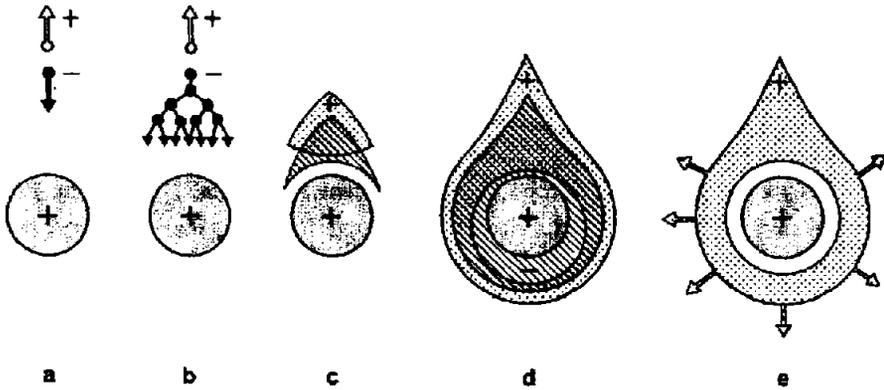
$$v = \frac{dr}{dt} = \omega \frac{E}{p} = \frac{\omega CV_o}{p} \frac{1}{2\pi\epsilon r} \quad \dots (3.18)$$

y por lo tanto:

$$\int_a^r r' dr' = \frac{\omega CV_o}{2\pi\epsilon p} \int_0^t dt' \quad \dots (3.19)$$

que implica,

$$r(t) = \left( a^2 + \frac{\omega CV_o t}{\pi\epsilon p} \right)^{1/2} \quad \dots (3.20)$$



**Figura 3.9** Esquema de la evolución temporal de avalancha alrededor del ánodo. El tiempo total transcurrido desde  $t(a)$  hasta  $t(e)$  es aproximadamente de 100 ns.

y al sustituir la expresión (3.20) en la ecuación (3.17) tenemos que,

$$V(t) = \frac{\omega CV_o}{\pi\epsilon} \ln \left[ \left( 1 + \frac{\omega CV_o t}{\pi\epsilon p a^2} \right)^{1/2} \right] \quad \dots (3.21)$$

El tiempo total de deriva se obtiene al considerar en la ecuación (3.20) que para el tiempo de deriva  $T$ , se tiene  $r(T)=b$  entonces,

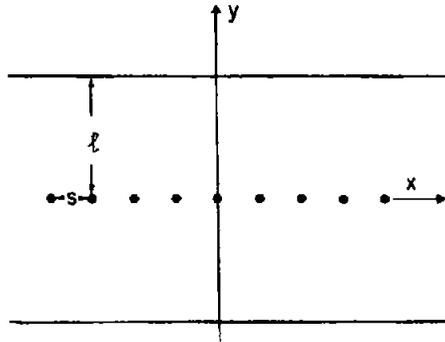
$$T = \frac{\pi\epsilon p (b^2 - a^2)}{\omega CV_o} \quad \dots (3.22)$$

Como se ha mostrado, la geometría cilíndrica de un solo alambre (delgado) es capaz de proveer intensidades de campo eléctrico suficientemente altas para iniciar una avalancha. Durante mucho tiempo se pensó que una estructura multialámbrica (como la que describe a continuación) no trabajaría

adecuadamente ya que la gran capacitancia existente entre alambres paralelos no apantallados causaría que la señal se difundiera a todos los alambres, frustrando cualquier intento por identificar en qué alambre se generó la avalancha.

En 1968 Charpak [21] y colaboradores mostraron que las señales positivas inducidas en los alrededores del ánodo compensarían y lograrían el apantallamiento para lograr que cada alambre actúe como un detector independiente.

La figura 3.10 muestra esquemáticamente la sección transversal de un contador proporcional multialámbrico (MWPC). La idea básica en la construcción consiste en colocar un conjunto de alambres paralelos (ánodo) montado simétricamente entre dos planos paralelos (cátodos). Por lo regular la distancia entre cátodo y ánodo ( $l$ ) se toma de 3 ó 4 veces el valor de la separación entre los alambres ( $s$ ) [5].



**Figura 3.10** Esquema de un corte transversal en un MWPC. Un conjunto de alambres paralelos (ánodo) son situados simétricamente entre dos planos (cátodos).

La expresión del campo eléctrico para este tipo de arreglo puede ser obtenida de forma analítica [26], sin embargo Erskine hace una aproximación [27] en la que se incluye la distorsión que se produciría si alguno de los alambres no estuviera en el mismo plano, dándose cuenta que, aunque en general no se cambia la velocidad de deriva de los electrones, ésta distorsión sí tendrá efectos en el factor de ganancia. Esto se entiende fácilmente porque la principal distorsión es cerca de la superficie de los alambres, y es ahí donde se genera la avalancha (ver figura 3.11 y 3.12).

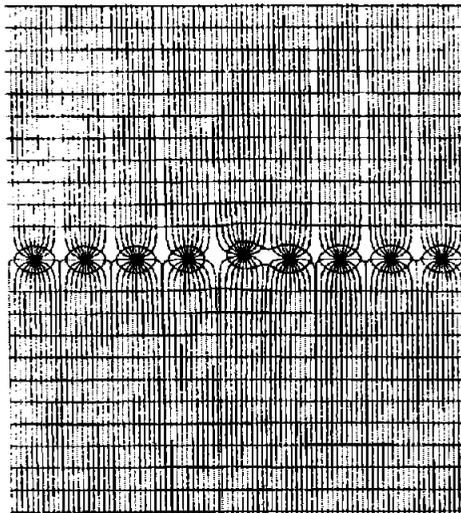
Siguiendo la notación de la figura 3.10 y poniendo a  $V(a)=V_0$  y  $V(l)=0$  se tiene ( $a$ =radio del alambre),

$$V(x,y) = \frac{CV_o}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{2\pi d}{s} - \ln \left( 4\text{Sen}^2 \left( \frac{\pi x}{s} \right) + \text{Senh}^2 \left( \frac{\pi y}{s} \right) \right) \right] \dots (3.23)$$

$$|E(x,y)| = \frac{CV_o}{2\epsilon s} \left[ 1 + \tan^2 \left( \frac{\pi x}{s} \right) \tanh^2 \left( \frac{\pi y}{s} \right) \right]^{1/2} \left[ \tan^2 \left( \frac{\pi x}{s} \right) + \tanh^2 \left( \frac{\pi y}{s} \right) \right]^{-1/2} \dots (3.24)$$

donde,

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\frac{\pi d}{s} - \ln \frac{2\pi a}{s}} \dots (3.25)$$



**Figura 3.11** Equipotenciales y líneas de campo en un MWPC. Puede apreciarse el efecto sobre el campo debido a un desplazamiento pequeño de uno de los alambres.

Si consideramos la aproximación para el caso  $s \gg y$ , la expresión del campo se puede reducir a,

$$|E(x,y)| \approx \frac{CV_o}{2\pi\epsilon s} \frac{1}{r} \dots (3.26)$$

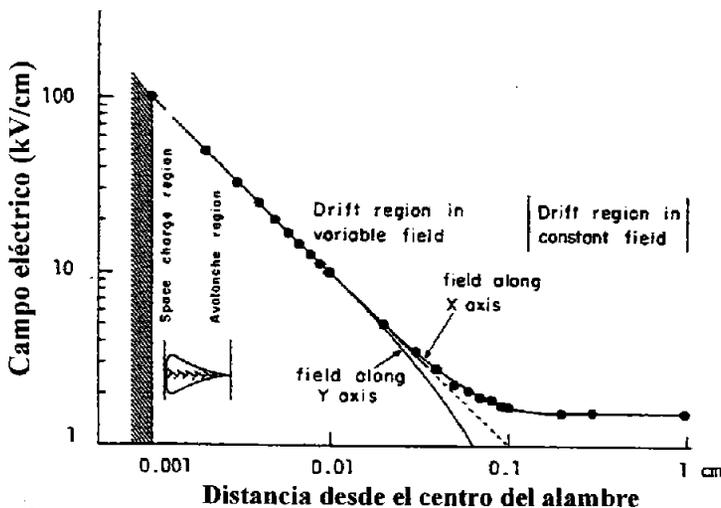
con  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ , que es similar a la expresión del campo en el caso de un SWPC. Por lo tanto, el proceso de avalancha descrito en la sección anterior es el mismo en este caso.

Por otra parte, si consideramos la línea de simetría  $x=0$  y para  $y > s$  se tiene que,

$$|E(0,y)| \approx \frac{CV_0}{2\epsilon s} \dots (3.27)$$

que es la expresión de un campo de magnitud constante.

Por lo tanto, en la deriva de cargas podemos distinguir tres regiones (ver figura 3.12). En la primera,  $E \approx \text{constante}$  (lejos de los alambres,  $r \sim 1$  cm), las cargas son conducidas hacia los electrodos. En la segunda, los electrones comienzan a sentir cómo el campo está cambiando de  $E \approx \text{constante}$  a  $E \approx 1/r$  y por último la región en la que el campo varía  $\approx 1/r$ , por lo que se alcanzan grandes intensidades, generándose la avalancha.



**Figura 3.12** Variación del campo eléctrico a lo largo del eje perpendicular al plano de los alambres (eje  $y$  en la figura 3.10). Se distinguen las tres regiones, lejos del ánodo ( $\sim 15a$ ) la región de campo constante, cerca del ánodo ( $\sim 10a$ ) el campo deja de ser constante y comienza a comportarse como  $1/r$  y por último la región en la que se genera la avalancha [5].

En la construcción de estos contadores el valor de los parámetros  $a$ ,  $s$  y  $l$  son muy importantes. Por ejemplo, para valores dados de  $a_0$ ,  $s_0$  y  $l_0$  se tiene una colección de carga  $Q=CV_0$ , si cambia el valor de alguno de los parámetros y se quisiera coleccionar la misma cantidad de carga, entonces, sería necesario incrementar o reducir  $V_0$  para compensar dicho cambio. Por ejemplo, ir de un espacio entre alambres de 2 mm a 1 mm y conservar el factor de ganancia (es decir la misma cantidad de carga coleccionada  $Q$ ) implica tener que incrementar

el voltaje  $V_0$  al menos al doble, lo cual puede ser problemático ya que intensidades de campo demasiado grandes podrían ocasionar que se generaran chispas en el contador.

Se podría pensar que una reducción en el valor de  $s$  podría compensarse reduciendo el valor de  $a$ , sin embargo, los valores típicos de  $a$  son alrededor de  $20\ \mu\text{m}$ , que no puede ser reducido mucho más por limitaciones mecánicas, ya que los alambres deben tener cierta tensión para evitar que debido a fuerzas electrostáticas cambien su posición inicial, causando distorsiones en el campo eléctrico.

La principal ventaja de la MWPC respecto al PPAC y al SWPC es que, como cada alambre se comporta como un detector individual, se puede saber en cual de los alambres se generó la señal y con esto tener información sobre la posición de la radiación que originó dicha señal. Esta sensibilidad a la posición cubriendo grandes áreas (desde unos cuantos  $\text{cm}^2$  hasta  $1\ \text{m}^2$ ) y el trabajar a presión atmosférica, han permitido la utilización de estos detectores en diversos campos como Radiología, Cristalografía, Física de Altas Energías, Astronomía y Física Nuclear.

Hasta el momento se han descrito los principales procesos físicos por los que se genera la señal en los contadores y algunas de sus características más relevantes, sin embargo, en la práctica para su diseño y operación hay que tomar en cuenta ciertos aspectos prácticos, de los cuales hablaremos en la siguiente sección.

### **3.2.7 Aspectos prácticos**

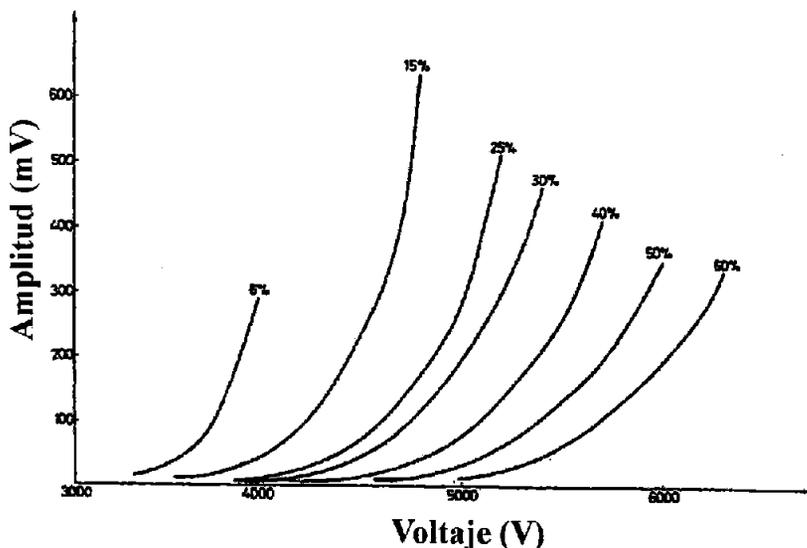
En el diseño y construcción de una cámara multialámbrica (MWPC) se deben tomar en cuenta ciertos aspectos prácticos como el precio de los componentes, la existencia de proveedores, etc. Que hagan completamente viable su operación, así como el mantenimiento o reparación en caso de mal funcionamiento. En esta sección se discutirán algunos de esos aspectos.

#### **Elección de gas**

Dado que el fenómeno de ionización se presenta en casi todos los gases, en principio se podría utilizar cualquier gas o mezcla de gases, sin embargo, los mejores son aquellos en los que la energía promedio para producir una ionización sea baja y se obtengan valores de  $M$  alrededor de  $10^5$  con el menor voltaje de operación posible.

Experimentalmente se han encontrado los mejores resultados utilizando gases nobles; dentro de ellos, las mejores opciones son el Kriptón y el Xenón que presentan un menor valor de  $W_i$  (energía promedio efectiva para producir un par); sin embargo, por razones económicas la mejor opción es el Argón. Con Argón se han reportado valores [28] del factor de ganancia alrededor de  $M \approx 10^3 \rightarrow 10^4$ . Este límite se debe principalmente a que durante el proceso de avalancha, además de ionizar, se excitan las moléculas del gas, las que para volver a su estado base emiten fotones de  $\approx 11.6$  eV de energía. La mayoría de estos fotones alcanzan el cátodo y tienen la energía suficiente como para arrancar electrones mediante el efecto fotoeléctrico [14], generando un gran número de fotoelectrones (al menos tantos como ionizaciones se produzcan), y por lo tanto se pueden provocar descargas continuas.

Es así, que para obtener valores de  $M$  mayores, es necesario eliminar a los fotoelectrones. Una forma de hacer esto, es introduciendo un segundo gas que sea capaz de absorber dichos fotones y no volver a emitir otro fotón. Gases orgánicos tales como el Metano ( $\text{CH}_4$ ), el Isobutano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) o el Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) han mostrado ser sumamente eficientes para absorber fotones en el intervalo de 7.9 a 14.5 eV que cubre el intervalo de emisión de fotones del Argón. Otros gases inorgánicos como el bióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) también son eficientes para capturar fotoelectrones.



**Figura 3.13** Tamaño de pulso obtenido con varias mezclas de  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ , variando la proporción de éste último, donde  $s=2$  mm y  $l=4$  mm (figura tomada de la referencia [5]).

Por otra parte, puesto que la velocidad de deriva puede ser afectada por las proporciones de cada gas en la mezcla, dependiendo del porcentaje de cada componente de la mezcla podemos esperar diferentes comportamientos, en especial en el tamaño de la señal generada y en el voltaje que se necesita aplicar para generarla. La figura 3.13 muestra como diferentes porcentajes de una mezcla Ar + CO<sub>2</sub> implican tener diferentes voltajes de operación para obtener el máximo tamaño de señal.

La adición de gases electronegativos (en especial freones como el CF<sub>3</sub>Br) algunas veces ayuda a incrementar el valor del máximo de la señal. Este componente se encarga de capturar electrones libres formando iones negativos que no pueden inducir avalanchas, ésta es una forma de controlar los fotoelectrones producidos por fotones no capturados, ya que algunos freones presentan mayor eficiencia para capturar electrones con energías similares a la de los fotoelectrones. Sin embargo, se debe tener cuidado con la cantidad de gas electronegativo que se introduce a la mezcla, pues se corre el riesgo de no sólo capturar fotoelectrones sino también los electrones producidos por ionizaciones de la partícula cargada y llegar a un punto en el cual, en lugar de ayudar, la adición de gas electronegativo, perjudica.

Por ejemplo, gases como el vapor de agua y el O<sub>2</sub> son altamente electronegativos, por lo que sí la mezcla contiene este tipo de contaminantes, se puede alterar significativamente el funcionamiento del detector.

Otro punto importante a considerar es que el principal proceso no radiativo por el que los gases capturan los fotones, es la disociación; es decir, el rompimiento de la molécula en radicales. Esto implica que después de cierto número de eventos, la composición del gas será diferente y se generará un cambio en el funcionamiento del contador.

Consideremos, a manera de ejemplo, un detector con un volumen de 10 cm<sup>3</sup> y una mezcla de 90% + 10% de un gas noble y un gas poliatómico a presión atmosférica, esto implica que se tendrán aproximadamente 10<sup>19</sup> moléculas del gas poliatómico. Tomando un valor de ganancia de  $\approx 10^5$  y considerando que se crean alrededor de 200 ionizaciones primarias por cada evento detectado, se tiene que por cada evento se están rompiendo alrededor de 10<sup>7</sup> moléculas. Si están ocurriendo alrededor de 10<sup>3</sup> eventos por segundo, se esperará entonces que después de una hora (es decir después de  $\approx 10^{12}$  eventos detectados) las características del detector hayan cambiado. Este problema se resuelve al tener un flujo constante de gas, que debe ser controlado de tal forma que la presión del gas se mantenga constante, ya que la presión influye en la operación del detector y por lo tanto debe ser un parámetro controlado.

Dado que la presión del gas es un parámetro a controlar, las mezclas presentan distintos comportamientos a diferentes presiones. En general se tiene que para presiones mayores a 100 torr, no se encontrará mayor diferencia, sin embargo para presiones menores se ha visto que los gases orgánicos puros dan mejores resultados que los gases nobles [29].

## Alambres

El diámetro de los alambres que se utilizan no debe ser mayor a 50  $\mu\text{m}$  y lo más común es utilizar 20 ó 25  $\mu\text{m}$ . Alambres de mayor diámetro no funcionan adecuadamente, debido a que no se alcanzan intensidades de campo suficientemente altas para generar la avalancha (recordemos que el campo cerca de los alambres varía  $\approx 1/r$ ).

Para compensar la fuerza electrostática que sienten los alambres y para mantenerlos fijos, es necesario aplicar cierta tensión mecánica en los mismos. Utilizar alambres de diámetro menor a las 10  $\mu\text{m}$  se vuelve sumamente inconveniente por no ser capaces de soportar la tensión necesaria para evitar que se desplacen de su lugar. Considerando este requerimiento, por lo regular se utiliza alambre de tungsteno, ya que este material presenta las mejores propiedades mecánicas para soportar la tensión a la que los alambres son sometidos. En la tabla 3.1 se presenta la tensión máxima a que se pueden someter alambres de tungsteno en función de su diámetro. Para mejorar la conductividad eléctrica usualmente estos alambres son recubiertos con oro.

Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Tensión máxima (N)
5	0.04
10	0.16
20	0.65
30	1.45
50	2.83

**Tabla 3.1** Valores de la tensión máxima a la que pueden ser sometidos los alambres de tungsteno en función de su diámetro.

## Soportes Mecánicos

Para construir el ánodo, usualmente se utilizan placas de G-10 (plástico hecho a base de resina epóxica) aunque en algunos casos se usan placas de fibra de vidrio cubiertas con cobre. Sobre estas placas y mediante procesos que pueden

ser de fotografiado, ataque químico o barrenado milimétrico computarizado, se realizan las pistas de lo que serán las conexiones eléctricas y conectores, esto se conoce como “circuito impreso”. Los alambres de tungsteno son soldados en dicho circuito, con el espaciamiento previamente diseñado.

En el caso del circuito de una cámara multialámbrica, y debido a que se manejan voltajes de unos cuantos kV, es especialmente importante evitar orillas afiladas y bordes puntiagudos, esto ayuda a evitar la acumulación de carga excesiva donde se puede generar una chispa. Al utilizar materiales metálicos en el diseño de la estructura, estos deben ser recubiertos en los extremos y bordes con cinta aislante que evite una posible descarga eléctrica a través de toda la estructura. Generalmente se usa cinta *Kapton*, cuyas características aislantes permiten el manejo de altos voltajes sin problemas de chispas o descargas eléctricas.

Los cátodos son por lo regular contruidos pegando sobre un marco de G-10 o de fibra de vidrio, una hoja de Mylar en la cual previamente se ha evaporado una película delgada de aluminio u oro ( $\approx 10^{-7}$  g/cm<sup>2</sup>). Sobre el marco previamente se graba un circuito, sobre el que se hacen las conexiones eléctricas. El contacto entre el Mylar y el marco se realiza, ya sea por contacto mecánico entre la superficie conductora del Mylar y la del marco, o mediante un pegamento conductor. Al diseñar cámaras multialámbricas con áreas de detección grandes ( $\sim 1$  m<sup>2</sup>) como es nuestro caso, existe la opción de construir los cátodos con láminas de fibra de vidrio con cobre en una cara, lo cual brinda una estructura mecánicamente más resistente y facilita los procesos de ensamble al reparar y abrir los detectores.

### 3.2.8 Determinación de la posición del evento detectado

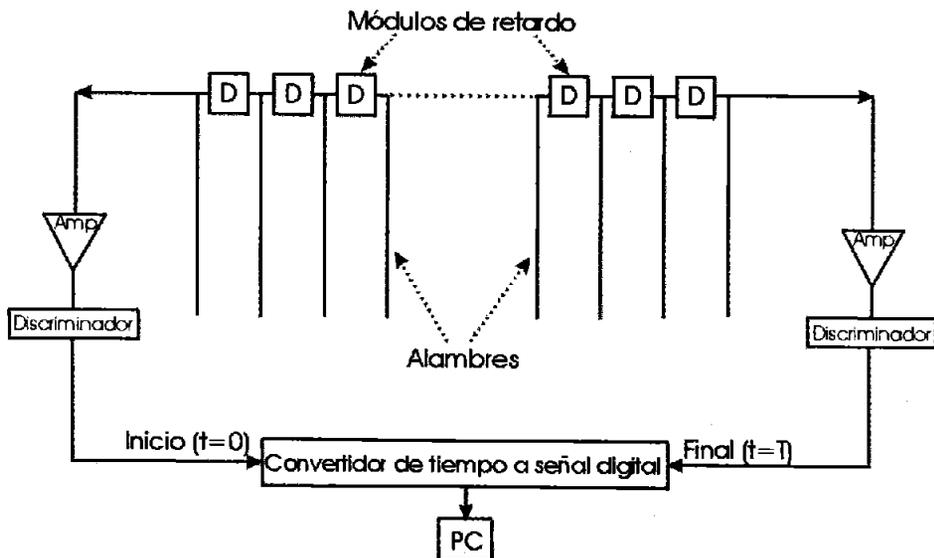
Como se ha mencionado, al tratar cada alambre como un detector independiente tenemos la posibilidad de conocer qué alambre fue el que generó la señal. En este sentido podemos clasificar dos casos, el primero (y más sencillo), es el de la lectura directa, es decir, instrumentar cada uno de los alambres y procesar las señales de forma independiente. Esta es quizás la mejor opción, sin embargo surgen una serie de inconvenientes tanto desde el punto de vista económico (se necesita instrumentar alambre por alambre) como desde el punto de vista técnico (se necesita un sistema de adquisición de datos con tantos canales como alambres).

Aunque para el presente proyecto, la mayor preocupación derivaba del consumo de energía eléctrica total para el sistema de detección (recordemos que el sistema fue diseñado para operar en un sitio arqueológico con muchas

restricciones). Es por esto que se buscaron métodos indirectos o de interpolación que son más prácticos y económicos de instrumentar. Entre los métodos más utilizados en cámaras multialámbricas se encuentran el de “división de carga” [6] y el de “retraso de tiempo” [30].

Para cámaras con áreas de detección como la nuestra ( $\sim 1 \text{ m}^2$ ), se han reportado múltiples complicaciones eléctricas y de lectura al instrumentar un método de división de carga por interpolación [5]. Por lo tanto, optamos por utilizar el método de retraso de tiempo por interpolación en dicho sistema de detección, el cual es explicado a continuación.

El método de retraso de tiempo se basa en conectar los  $n$  alambres con elementos capaces de retrasar la señal una determinada cantidad fija de tiempo  $\delta t$ , formando una cadena de retraso (Fig. 3.14).



**Figura 3.14** Determinación de la posición utilizando el método de retraso de tiempo. En el diagrama se aprecian líneas de retardo, preamplificadores sensibles a la carga y discriminadores.

Como el retraso inducido es conocido, y además “discreto” (en cantidades fijas  $\delta\tau$ ), si se toma como referencia uno de los extremos de la cadena y se hace la diferencia respecto al otro, los valores de dicha diferencia serán discretos y dependerán de cuál fue el alambre en que se generó la señal. Si tenemos  $n$  alambres y por cada alambre la señal se retrasa  $\delta\tau$ ; y si la señal se generó en el alambre número  $x$ , tenemos que el retraso total es:

$$\Delta t = ((n - x)\delta\tau - (x)\delta\tau) = (n - 2x)\delta\tau \quad \dots \quad (3.28)$$

donde  $\Delta t$ ,  $\delta\tau$  y  $n$  son cantidades establecidas y por lo tanto se puede conocer  $x$ .

La instrumentación necesaria para implementar este método consiste básicamente en preamplificadores sensibles a la carga, amplificadores rápidos, discriminadores (de fracción constante) y un convertidor de tiempos a amplitudes, o bien, un convertidor de tiempo a señal digital. Los elementos de retraso pueden encontrarse comercialmente (por ejemplo, el módulo de retraso SIP5-405 de Rhombus utilizado en este trabajo) o pueden fabricarse mediante el uso de un elemento inductivo y uno capacitivo [31]. El inconveniente de este método, es que, debido a que se quiere modificar lo menos posible el tiempo de generación de la señal, no se adicionan filtros por lo que se amplifican tanto la señal como las señales de fondo (ruido).

## Capítulo 4

### Experimento de la Pirámide del Sol

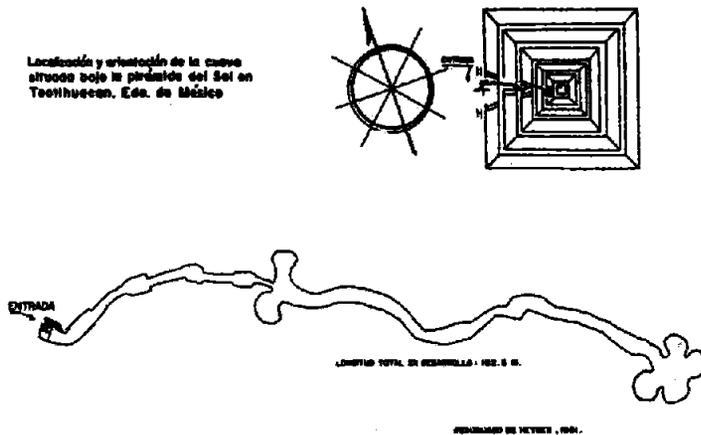
Nuestro país es un digno ejemplo de riqueza prehispánica constituida en gran medida por magnas construcciones, cuya muda presencia refleja la grandeza de culturas pasadas. Muestra de ello lo constituye la Pirámide del Sol en Teotihuacan, cuyos vestigios aún esconden rastros sobre la gente y gobierno que ahí existió. Una forma de conocer más sobre esta civilización perdida en el tiempo es a través de los datos que puedan obtenerse de la estructura interna de sus pirámides. El proyecto descrito aquí, nació con la finalidad de dar respuesta a ese tipo de interrogantes.

Los principios de detección a utilizar en Teotihuacan están basados en la técnica del Premio Nobel Luis Álvarez, quien en 1969 implementó un experimento en el interior de la pirámide de Kefrén en Egipto, con la finalidad de encontrar bóvedas ocultas dentro del citado monumento a través del flujo detectado de muones [1]. La implementación de una técnica instrumental similar en México con el mismo objetivo que el de Álvarez era realizable gracias a la existencia, en particular, de un túnel situado debajo de la Pirámide del Sol en Teotihuacan. Características que dieron como resultado el inicio de un proyecto avalado por la UNAM, cuya principal meta era la búsqueda de posibles cámaras (espacios vacíos) en el cuerpo de la pirámide, a través del flujo detectado de muones atmosféricos.

Una de las principales características tomadas en cuenta durante el diseño del sistema de detección fue su ulterior utilización en un sitio arqueológico. Normalmente la mayoría de los sistemas diseñados para la detección de rayos cósmicos (ya sean centelleadores o cámaras multialámbricas) operan bajo condiciones controladas, o bien, en el interior de laboratorios con instalaciones adecuadas para el manejo y cuidado de distintos equipos electrónicos.

En nuestro caso, todas y cada una de las partes que integrarían al sistema de detectores en conjunto debían cumplir con una serie de especificaciones mecánicas, eléctricas, electrónicas y de seguridad, que garantizaran su estable y confiable operación dentro del túnel situado debajo de la Pirámide del Sol en Teotihuacan (ver Fig. 4.1). Así mismo, los detectores de centelleo y las cámaras multialámbricas necesitaban varias características especiales, las cuales ponían énfasis en las etapas de

transportación y colocación en una zona agreste cuyas condiciones ambientales, aunadas a las restricciones del sitio arqueológico, exigían la máxima resistencia y durabilidad dadas las expectativas del proyecto en conjunto.



**Figura 4.1** Esquema de la localización y geometría del túnel situado debajo de la Pirámide del Sol en Teotihuacan.

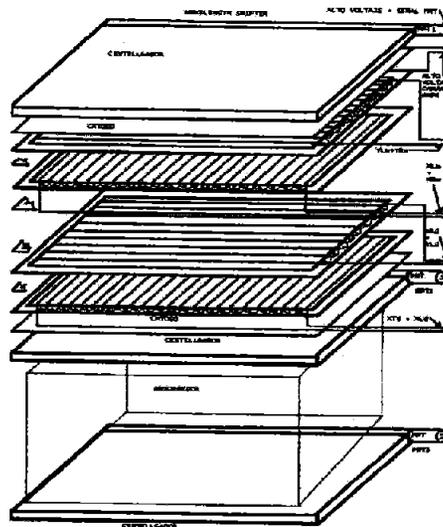
El túnel, donde se va a instalar el detector, es de formación natural y parece fue formado por una burbuja de aire que quedó atrapada al paso del magma. Por considerarse parte de la pirámide, también está declarado patrimonio de la humanidad y por tanto está al resguardo de las autoridades del INAH, causa por la cual está prohibido realizar cualquier tipo de modificación en su interior. La parte final del túnel tiene forma de flor, es un área lo suficientemente amplia para permitir la colocación del sistema de detección. Ésta es la parte que casi queda situada al centro de la pirámide, por lo que es el lugar más adecuado para la instalación de toda la instrumentación necesaria para el proyecto. La distancia vertical existente entre el techo de la citada cueva y la punta de la pirámide es de 65 m.

Por tratarse de una cueva el punto planeado para la colocación de los detectores y la electrónica de lectura asociada, fue necesario realizar varios viajes al sitio arqueológico con la finalidad de cuantificar las extremas condiciones ambientales y físicas del lugar, las cuales se mencionan en la siguiente sección.

## 4.1 Requerimientos básicos

Para lograr la detección de muones, se ha planeado un sistema que cuente con dos tipos de detectores de rayos cósmicos. Por un lado, se utilizarán detectores de centelleo y por el otro, cámaras multialámbricas. La función que tendrán los detectores de centelleo será la de asegurar la ocurrencia de un evento, para que una vez que se tenga dicha aseveración, pueda tomarse en cuenta la señal de posición obtenida de la cámara multialámbrica correspondiente. La utilización de los dispositivos de verificación es necesaria, pues los detectores multialámbricos son sensibles también a otro tipo de radiación diferente a la cósmica, como por ejemplo, la radiación de fondo [14].

En el presente trabajo me enfoqué únicamente al diseño, construcción, implementación y optimización de un par de detectores de centelleo y una cámara multialámbrica unidimensional (con un solo plano de alambres), por considerarlo el arreglo mínimo necesario para instrumentar la electrónica asociada y detectar la radiación de interés, ya que la implementación de más arreglos tipo  $xy$  (ver Fig. 4.2) implica añadir canales de adquisición de datos con el mismo desarrollo instrumental que aquí se presentará.



**Figura 4.2** Propuesta del sistema de detección, integrado por un par de centelleadores y dos cámaras  $xy$ .

Considerando que es la primera vez que se construye un detector de este tipo, tamaño y características especiales en nuestro país, y al no contar con experiencia previa en lo referente a la instrumentación de un arreglo de detectores de tal magnitud, se optó en una fase inicial, por construir prototipos que permitieran experimentar con diferentes materiales y técnicas de lectura de datos, haciendo posible comparar las ventajas de utilizar distintos materiales sin que la inversión fuera muy significativa, ganando así pericia y experiencia en las distintas etapas de construcción. Las enseñanzas aprendidas con cada prototipo en particular se mencionan más adelante.

Durante las distintas etapas de construcción se establecieron inicialmente las siguientes condiciones:

- a) El diseño obtenido debe garantizar un correcto funcionamiento del detector
- b) El costo necesita ser el más bajo posible
- c) Debe ser seguro para los operadores
- d) Garantía de funcionamiento de por lo menos 6 meses libre de mantenimiento
- e) Fácil de reparar
- f) Construcción en el menor tiempo posible

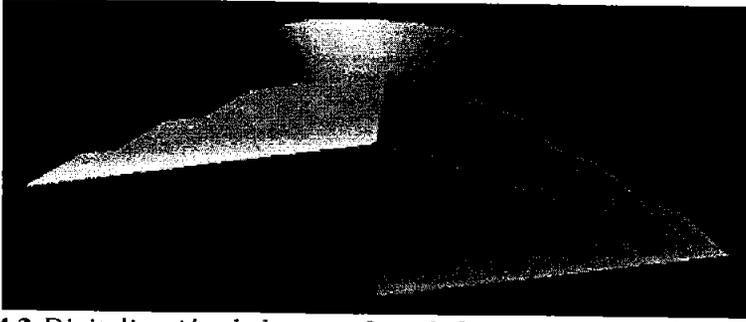
Para conseguir todo esto, no debemos desatender condiciones como: el transporte de los equipos hasta la cueva y su ulterior colocación, en donde seguramente recibirá leves impactos que pudieran poner en riesgo la integridad de los detectores; la humedad del medio ambiente en que permanecerán operando las 24 horas del día, en un periodo de tiempo de al menos un año. Además que el sistema de monitoreo será remoto desde Ciudad Universitaria, por lo que en caso de falla la reparación no será inmediata.

Al colocar dos detectores uno encima de otro, con una cierta separación entre ellos, se forma lo que se conoce como “ángulo sólido de detección”<sup>\*</sup>. Dicha disposición geométrica, permite tener una mayor área de detección al fijar una menor separación entre detectores.

Aplicando este concepto a nuestro sistema de detección, tenemos que al colocar bajo la pirámide dichos detectores, se formará sobre ellos un prisma sólido. Por lo que la radiación que incida en la pirámide dentro del volumen correspondiente al prisma, será detectada por el sistema en conjunto (Fig. 4.3). El volumen del prisma depende del ángulo sólido del mismo, el cual está en función de la separación existente entre los detectores.

---

<sup>\*</sup> Ángulo sólido es la medida de la abertura de un cono



**Figura 4.3** Digitalización de la superficie de la pirámide con el ángulo sólido central de detección.

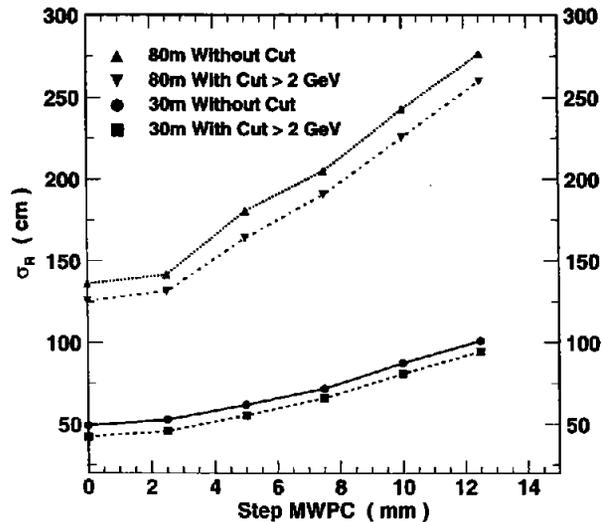
Como se muestra en la figura 4.3, el cono que representa al ángulo sólido de detección se encuentra situado justo encima de la cueva situada en la región central de la pirámide, que es la zona en que se especula puedan estar dichas cámaras. Debido a que la geometría de los detectores será cuadrada, la forma del ángulo sólido corresponde a la de un prisma, sin embargo, para efectos de ilustración es que en la figura 4.3 aparece el volumen de detección con geometría cónica.

Respecto a la abertura de detección del citado cono, se optó por un valor de  $\pm 60^\circ$ , tomando en cuenta cubrir el mismo volumen de detección que en el experimento de Álvarez realizado en la pirámide de Kefrén [1].

A través del resultado de cálculos y simulaciones numéricas tipo Monte Carlo realizadas por investigadores del grupo en el que participé, fue posible conocer las principales características físicas que ayudarían a optimizar el sistema de detección, en base a las propiedades físicas y geométricas del cuerpo de la pirámide y del punto propuesto para la colocación del conjunto de detectores. Otro factor tomado en cuenta fue la frecuencia de eventos detectados dentro de la cueva, la cual será de aproximadamente 30 Hz.

Un aspecto importante estudiado fue la resolución espacial, que depende de la habilidad del detector para reconstruir las trayectorias de las partículas. La resolución se cuantifica como el error asociado a la reconstrucción del “punto de entrada” de los muones a partir de la superficie externa de la pirámide. La dispersión múltiple y las limitaciones de reconstrucción propias del detector convierten este punto en una distribución radial de tamaño finito, conocida como la “función de dispersión puntual”. Esta función presenta un comportamiento de tipo gaussiano con una desviación estándar  $\sigma_R$  que puede considerarse como una estimación de la resolución.

A través de las simulaciones mencionadas, pudo obtenerse el comportamiento de  $\sigma_R$  respecto al espaciamiento entre alambres del detector multialámbrico a construir (ver Fig. 4.4). Dichos cálculos se hicieron para dos espesores, tomando en cuenta la mínima y máxima distancia esperada que existirá entre el detector y la superficie de la pirámide [2].



**Figura 4.4** Resolución vs espaciamiento entre alambres para dos espesores de la pirámide (tomada de la referencia [2]).

Como resultado de tales simulaciones, y en lo que se refiere a la geometría del sistema de detección multialámbrico en particular, se llegó a la conclusión de que una separación entre los alambres de 5 mm será suficiente para lograr la detección de muones con una buena resolución. Con esta separación, la pérdida en resolución espacial del detector es menor al 12%, comparándola con la resolución de un detector ideal en que la distancia entre alambres tiende a cero [2].

No obstante, durante las primeras etapas de construcción de estos detectores, decidí experimentar con distancias entre alambres menores a la indicada, para tener registros del comportamiento eléctrico y las exigencias instrumentales presentes en dichas configuraciones.

Un elemento considerado durante las citadas simulaciones fue la densidad de la estructura que conforma a la Pirámide del Sol. Dicha variable determina el valor de energía que pierden las MIPs al atravesarlo. En este caso, la densidad estimada de los materiales de que está compuesta es de  $\rho = 1.9 \text{ g/cm}^3$  [2], por lo que la energía que cederán los muones al atravesar la pirámide será de aproximadamente  $3.8 \text{ MeV}\cdot\text{cm}$ . La energía cedida por un muón que atraviese casi 80 metros, desde la cima de la pirámide hasta el túnel donde se colocará el sistema de detección, será entonces, de aproximadamente 25 a 30 GeV.

No podemos afirmar que los muones siempre cederán esa energía, porque en caso de que la densidad de los materiales que componen la estructura de la pirámide no fuese uniforme, y en algunas partes fuese menor, la energía cedida también disminuirá. Por esta razón, se estima que los muones que sean detectados serán los que tengan energías mayores a 18 GeV antes de interactuar con la pirámide [2]. A pesar de que existen muones con energías mayores a 100 GeV, la frecuencia con que ocurren estos es de un par de órdenes de magnitud menor a la de muones con energías de unas cuantas decenas de GeV, por lo que su contribución no es tan significativa [8].

## 4.2 Condiciones del sitio

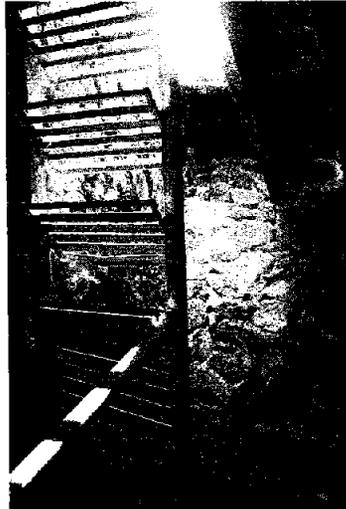
### 4.2.1 Aspectos geométricos

Una importante característica que los detectores debían cumplir, era que sus dimensiones permitieran introducirlos a través de la puerta de entrada al recinto subterráneo de Teotihuacan. Para ello, realicé mediciones en el sitio arqueológico para conocer las limitaciones espaciales existentes en el lugar, así como las condiciones ambientales a lo largo del túnel y en la cueva.

Teniendo esto en mente, se construyó una estructura de madera con las dimensiones planeadas para cada uno de los elementos de detección (tanto centelleadores como cámaras multialámbricas). Dicha estructura paralelepípeda cuyas dimensiones eran de  $(120 \times 120 \times 15) \text{ cm}^3$  sirvió para comprobar las técnicas que serían necesarias para introducir los detectores (ver Fig. 4.5), desplazarlos a lo largo del túnel y después colocarlos en la cueva central.



**Figura 4.5** Colocación de la estructura que simula las dimensiones de un elemento de detección a través de la puerta que conduce al sitio subterráneo.



**Figura 4.6** Entrada al túnel y escalera metálica dentro del recinto subterráneo en la Pirámide del Sol.

Una vez introducida la estructura por la pequeña puerta, cuyas dimensiones eran de  $(59 \times 142) \text{ cm}^2$ , y habiendo descendido unos 8 metros por una estrecha escalera metálica en pésimas condiciones (ver Fig. 4.6), existía aún un lugar

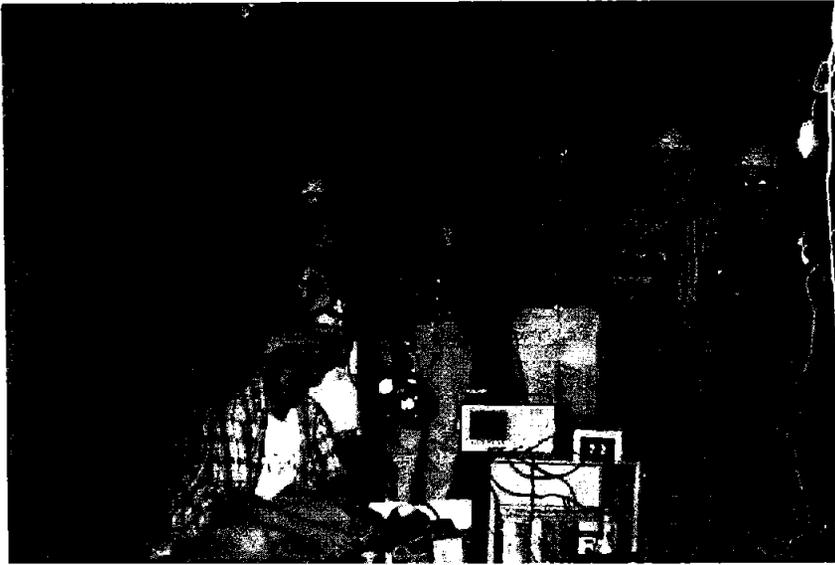
más reducido dentro del túnel (ver Fig. 4.7), con un tamaño de (50x124) cm<sup>2</sup>. lugar a través del cual se deslizó la estructura hasta llegar a la cueva central, cuya área de aproximadamente 4x4 m<sup>2</sup> y altura de 2 m en el punto máximo, la hacían propicia para la instalación del sistema completo.



**Figura 4.7** Una de las zonas de mayor difícil acceso en el túnel donde tendrá que atravesar el sistema de detección

Consecuencia de su origen natural, el túnel carece de una estructura uniforme, por lo que a lo largo de sus más de 100 metros varía tanto en altura como en amplitud. En las partes más difíciles para el acceso, la altura del túnel apenas sobrepasa un metro y en otros tramos la amplitud sólo permite el paso de una persona a la vez y en cuclillas; también se debe considerar que hay piedras de tamaño considerable que salen del techo, las paredes y el piso, con las que se debe tener especial precaución para no sufrir una lesión.

Al introducir y colocar con éxito la estructura que simulaba las dimensiones de un detector (ver Fig. 4.8), pude conocer las distancias máximas que nuestros diseños debían cumplir. Así mismo, decidí que el área máxima de detección con la cual podríamos construir cada uno de los detectores sería de no más de (1 x 1) m<sup>2</sup>, debido entre otras razones, al limitado espacio con el que se contará al introducir y colocar cada sistema de detección a lo largo del recinto subterráneo.

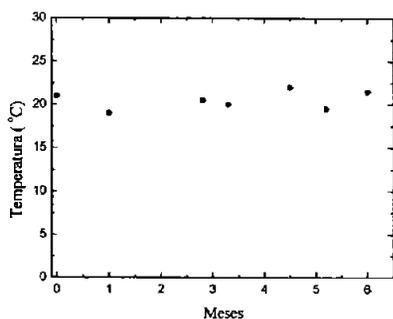


**Figura 4.8** Vista parcial de la cueva situada al final del túnel. En la imagen aparece parte del grupo de investigación involucrado en el proyecto.

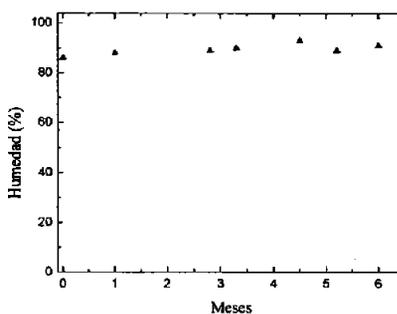
#### **4.2.2 Condiciones ambientales**

En dicho sitio, la temperatura registrada era de 21°C, mientras que para la humedad se reportaba un valor del 90%. Estas variables ambientales fueron monitoreadas durante 6 meses dejando en la cueva sensores digitales con memoria integrada. Como resultado de dicha acción, adquirí los mismos registros a lo largo del día y la noche durante el periodo mencionado, salvo pequeñas variaciones que no excedían el 6% para la temperatura, y un 4% en el caso de la humedad (ver Fig. 4.9). Por lo que pude comprobar la alta estabilidad ambiental en la cueva, debida entre otros factores, a los más de cien metros de longitud del túnel que evitan la entrada de corrientes de aire significativas hacia el sitio subterráneo.

Una restricción importante para el diseño y planeación del proyecto era el limitado consumo de energía eléctrica que demandaría el sistema. Esto debido, entre otros factores, a restricciones inherentes en un sitio arqueológico y la existencia de una línea de suministro cuya operación no debía exceder los 4 kW, debido al calibre y características del cable utilizado, todo esto con el fin de evitar una sobrecarga en la instalación.



a)



b)

**Figura 4.9** Comportamiento registrado durante 6 meses dentro de la cueva para: a) Temperatura y b) Humedad.

Otra exigencia propia de los detectores a construir era su estabilidad mecánica y resistencia ante las condiciones de transporte y reparación, ya que como hemos mencionado, el sistema sería destinado a un lugar que no cumple con las normas mínimas existentes en un laboratorio. Además de la necesidad de contar con piezas ligeras y fáciles de ensamblar o reparar en cualquier lugar.

Para la construcción de los detectores fue necesaria la implementación de varias etapas de diseño con sistemas prototipo y modelos a escala con todas y cada una de las características planeadas para el sistema final y completo. A su vez, experimenté con los mejores materiales reportados en la literatura y disponibles ya fuera en México o en el extranjero para garantizar un óptimo y confiable conjunto de detectores construido en todos sus detalles y por completo en talleres y laboratorios de la UNAM. Las especificaciones, materiales y técnicas utilizadas para cada parte del sistema de detección se exponen en las siguientes secciones.



## Capítulo 5

### Diseño, construcción e instrumentación del sistema de detección

#### 5.1 Detectores de Centelleo

Dadas las limitaciones de espacio y las ulteriores condiciones de transporte hacia el sitio arqueológico que nuestro sistema enfrentaría, una de las mejores opciones era la utilización de placas de plástico centelleador. El tipo de detector que cumplía las necesidades y exigencias del proyecto, así como los elementos ópticos asociados, estaban disponibles comercialmente y presentaban una serie de características que a continuación se mencionan.

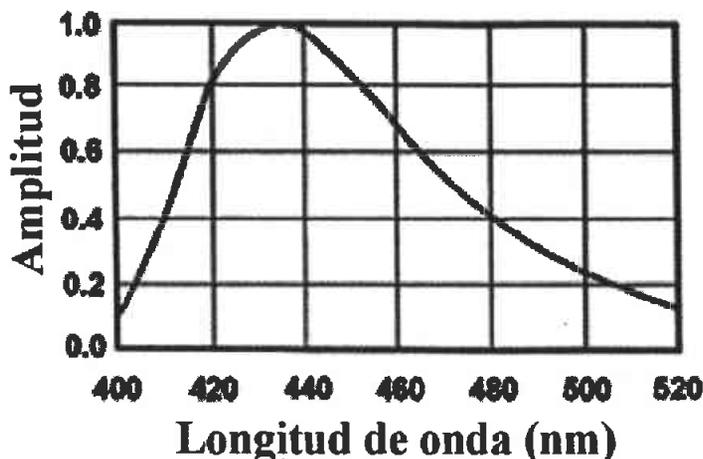
##### 5.1.1 Plástico centelleador y elementos asociados

El tipo de centelleador que se eligió para formar parte del *trigger* para muones fue el modelo EJ-208 de la compañía *Eljen Technology*. En una presentación de placas cuyas dimensiones eran de  $(100 \times 100 \times 1)$  cm<sup>3</sup>. El área de la placa era la indicada para cubrir la región activa de la cámara multialámbrica, mientras que el grosor ofrecía una ventaja en cuanto al peso y al acoplamiento óptico que más adelante se expone.

El detector está diseñado para utilizarlo en grandes áreas, donde la uniformidad en la colección de luz es una prioridad, mientras que la longitud de atenuación óptica asociada oscila alrededor de los 4 metros [32]. El centelleador EJ-208 posee una de las longitudes de atenuación óptica más larga entre los centelleadores “azules” comúnmente utilizados, lo que lo convierte en un candidato ideal para aplicaciones que incluyan guías de luz de formas complejas o muy largas. Sus principales características se citan a continuación.

- Salida de luz (respecto del Antraceno): 60 %
- Longitud de onda de la emisión principal: 435 nm
- Tiempo de formación de pulso (*rise time*): 1.0 ns
- Tiempo de decaimiento (*decay time*): 3.3 ns
- Ancho de pulso (*FWHM*): 4.2 ns
- Átomos de Hidrógeno por cm<sup>3</sup>:  $5.23 \times 10^{22}$

- Átomos de Carbono por  $\text{cm}^3$ :  $4.74 \times 10^{22}$
- Electrones por  $\text{cm}^3$ :  $3.37 \times 10^{23}$
- Densidad:  $1.032 \text{ g/cm}^3$
- Índice de refracción: 1.58
- Base polimérica: Poliviniltolueno
- Coeficiente de expansión lineal:  $7.8 \times 10^{-5}$



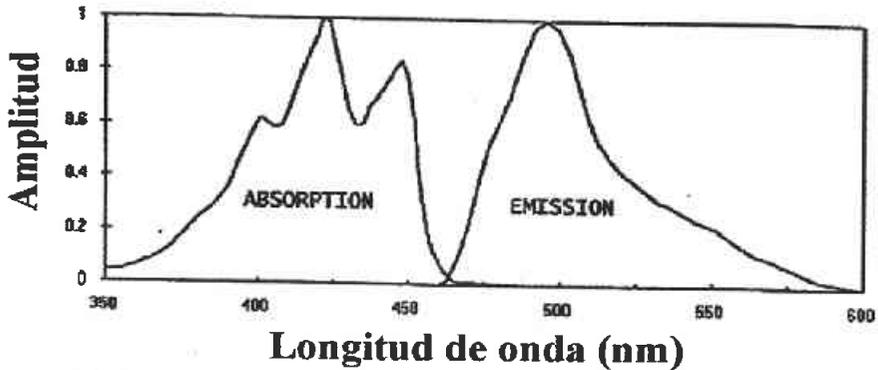
**Figura 5.1** Espectro de emisión del plástico centelleador EJ-208 de Eljen Technology [32].

Otra ventaja en el uso de este tipo de detectores plásticos es su compatibilidad química. Por ejemplo, al limpiarlos es común el uso de una solución jabonosa sin dañar su superficie o alterar las propiedades ópticas. También es posible la aplicación de grasas a base de silicón y pegamentos tipo *epoxy* de secado instantáneo o retardado, que en general no atacan la estructura externa del centelleador y son fáciles de pulir con materiales tales como el papel (bond) o borlas a alta velocidad.

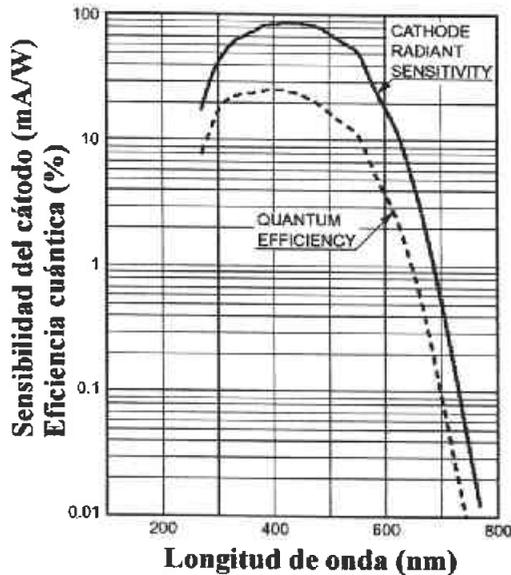
Para la recolección de luz producida en el centelleador utilizamos barras corredoras de frecuencia *Bicron BCF-92* de  $(1 \times 1 \times 100) \text{ cm}^3$ . Cuyo corrimiento de frecuencia del azul al verde, y respectivo espectro de emisión (ver Fig. 5.2), coincide con el intervalo de respuesta del siguiente elemento óptico a acoplar, el tubo fotomultiplicador.

Cabe mencionar, que los tubos fotomultiplicadores empleados son de la marca *Hamamatsu* modelo R1450, mientras que las bases – con la red resistiva interconstruida – con las cuales se conectaron, también de la misma compañía, son modelo E974-13. Las principales características de estos PMT's (ver Fig. 5.3) son las que a continuación se citan [20].

- Intervalo de respuesta espectral: (300 – 650) nm
- Longitud de onda del pico principal: 420 nm
- Material del fotocátodo: Biálcali
- Material de la ventana del PMT: Vidrio de Borosilicato
- Número de dínodos (etapas multiplicadoras): 10
- Voltaje típico de operación: - 1500 V



**Figura 5.2** Respuesta espectral de la fibra corredora de frecuencia BCF-92 de Bicon.



**Figura 5.3** Intervalo de respuesta y eficiencia cuántica del PMT R1450 de Hamamatsu.

## 5.1.2 Estructura contenedora

Comúnmente, este tipo de detectores son colocados en contenedores o estructuras selladas especialmente diseñadas, cuyo principal objetivo es el de impedir el paso de luz externa hacia el interior de la misma. Esto con el objetivo de eliminar la posibilidad de que la ventana del tubo fotomultiplicador (PMT) reciba luz del exterior, la cual puede provocar señales espurias que no corresponden a la radiación estudiada, o bien, dañar por completo el funcionamiento del citado aparato debido a la saturación de fotoelectrones multiplicados dentro del mismo.

En nuestro caso, la estructura destinada a albergar el plástico centelleador y el dispositivo de fotomultiplicación también debía ofrecer una estabilidad mecánica que le permitiera su transportación, traslado y permanencia dadas las condiciones existentes en Teotihuacan. Entre los materiales comúnmente utilizados podemos mencionar el acrílico, la madera, el *nylamid* o metales como el acero.

Por otro lado, una estructura de acero brindaría la estabilidad mecánica que un arreglo de tales dimensiones exige, sin embargo, el peso de este material por sí mismo, lo convertía en una opción poco viable si recordamos las extremas condiciones de transporte y traslado que dichos detectores requerirán. Pensando en ello, se diseñó una caja formada por láminas de aluminio.

A cada uno de los centelleadores utilizados se les retiró la cubierta de papel protectora con la que vienen de fábrica, usando durante el manejo de los mismos guantes de látex, para evitar cualquier contacto directo con la superficie del plástico. Esto debido a que la grasa natural de la piel afecta las características del detector. Cada placa fue depositada sobre una hoja de lucita de 5 mm de espesor dentro de la caja de aluminio (ver Fig. 5.4) formada con barras del mismo material cuya sección transversal cuadrada era de 1 pulgada y cuyas tapas tenían un grosor de 1/8 ”.

La caja de aluminio así formada, con tornillos de 3/16 ” situados cada 10 cm en las orillas, tenía las dimensiones de (110x120x3) cm<sup>3</sup> y representa la geometría máxima permitida dadas las características del túnel por donde se tendrán que mover los detectores hasta la cueva principal. En cada uno de los centelleadores fue colocada a lo largo de todo un costado una barra corredora de frecuencia para el transporte de fotones desde el centelleador hasta el tubo fotomultiplicador.



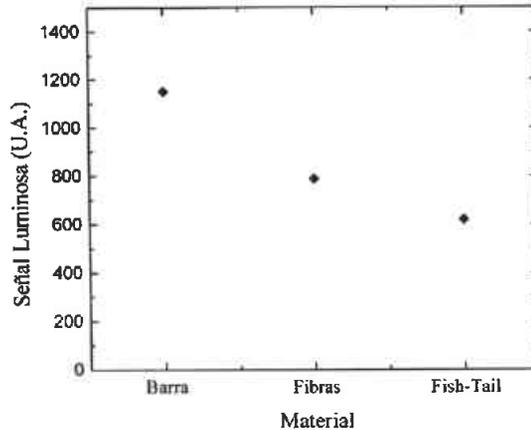
**Figura 5.4** Estructura de aluminio y principales componentes del detector de centelleo.

La elección de la citada barra obedeció a los resultados de experimentos realizados previamente donde se utilizaron racimos de fibras corredoras de frecuencia adheridas con pegamento para centelleador y terminadas en un cilindro de lucita para su correcto acoplamiento a la ventana del tubo fotomultiplicador. En dichas pruebas se irradiaba con partículas  $\beta$  (por ser partículas de mínima ionización al igual que los muones) y se cuantificaba la eficiencia de recolección de luz desde el centelleador hasta la ventana del tubo fotomultiplicador midiendo la amplitud del pulso obtenido por el sistema de detección.

También se experimentó la lectura de los detectores con el acoplamiento de piezas de lucita transparente conocidas como *fish tails* o “colas de pescado” que ofrecen una geometría triangular hacia el detector y una cilíndrica hacia el PMT. Las citadas mediciones fueron realizadas acoplando cada elemento por separado, donde la señal amplificada era analizada en forma de espectro con un convertidor analógico digital (ADC). Estos resultados se muestran en la figura 5.5.

Las medidas así obtenidas mostraron mejores resultados (~ 30% respecto a las técnicas antes mencionadas) al implementar el centelleador con una barra corredora de frecuencia colocada a lo largo de todo un costado usando grasa óptica *Bicron BC-630* para un mejor acoplamiento entre el centelleador y la barra. El extremo de la misma también fue acoplada a la ventana del PMT usando la misma grasa y cubriendo la unión primero con

cinta tipo teflón color blanco y después con cinta adhesiva negra. La primer cinta tenía como objetivo ayudar a una buena reflexión interna en la unión, mientras que la segunda fue puesta para evitar la posible incidencia de luz externa hacia el dispositivo.

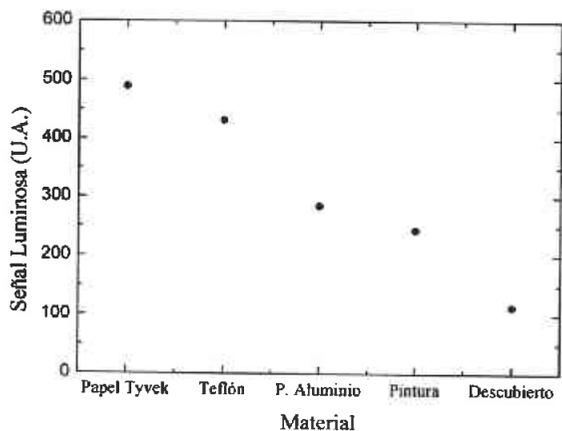


**Figura 5.5** Medidas de la señal luminosa generada en el centelleador para distintos elementos de acoplamiento.

Existen numerosos dispositivos y geometrías diversas para acoplar centelleadores y PMT's que involucran la utilización de pequeños prismas o paralelepípedos de lucita que se acoplan a lo largo de todos los costados de un centelleador de tales dimensiones usando varios tubos fotomultiplicadores para su lectura; sin embargo, cabe recordar que una de las exigencias del sistema de detección en conjunto era el gasto mínimo de energía eléctrica por las restricciones del sitio anteriormente mencionadas. Por tal motivo, se optó por utilizar sólo un PMT por detector de centelleo, haciendo una colección de luz a través de la barra corredora de frecuencia acoplada al centelleador y a la ventana del PMT. En esta última unión también se aplicó grasa óptica.

Para la elección del material que cubriría toda la superficie del detector dentro de la estructura de aluminio con el fin de evitar al máximo el escape de fotones producidos por el paso de las partículas y tener mayor reflexión interna de luz, se probaron distintos materiales, tales como papel *Tyvek*, cinta de teflón blanca, papel aluminio y pintura blanca para plásticos centelleadores. Las mediciones se realizaron irradiando con partículas  $\beta$  ( $^{90}\text{Sr}$ ) un plástico

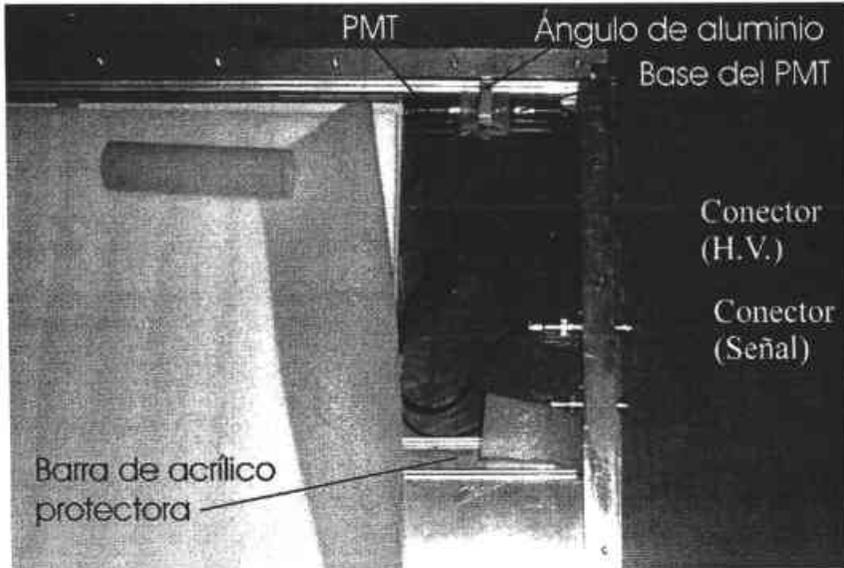
centelleador de  $(25 \times 15 \times 1)$  cm<sup>3</sup> acoplado con un prisma de lucita (*fish tail*). Los resultados de dichas pruebas se muestran en la figura 5.6.



**Figura 5.6** Medidas de la señal luminosa producida en el centelleador para diferentes materiales.

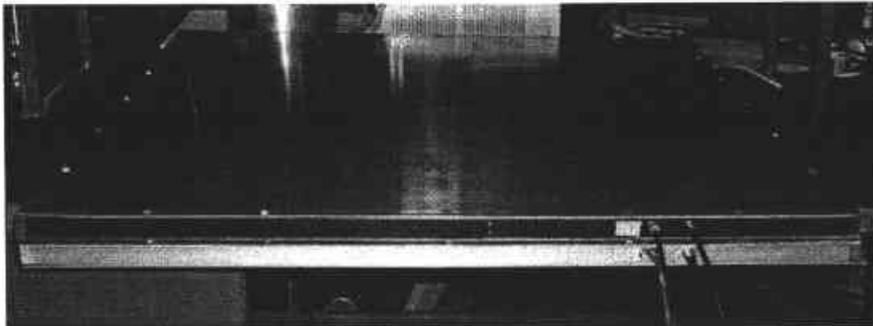
Los mejores resultados fueron obtenidos con papel *Tyvek* color blanco cuya textura y características físicas son idóneas para resistir la humedad del ambiente sin presentar una degradación seria, factor vital si ha de pensarse que estos detectores están diseñados para operar en un lugar como la cueva de Teotihuacan. De esta manera los plásticos centelleadores fueron forrados con dicho material una vez habiendo aplicado una capa de pintura *Bicron* especial para centelleadores color blanca en todas las orillas del mismo, y acoplado su respectiva barra corredora de frecuencia. La utilización de pintura blanca en los costados del centelleador tenía como objetivo incrementar la reflexión interna de fotones, que redundaría en una menor pérdida luminosa.

A cada lado de la placa detectora se ajustaron barras de acrílico cuya sección cuadrada era de  $(2 \times 2)$  cm<sup>2</sup>, con el fin de asegurar que el sistema completo no se deslizara dentro de la caja durante su transportación. Así mismo, se utilizó hule espuma (ver Fig. 5.4) para cubrir el detector completo para brindarle una delgada cubierta protectora en caso de impactos leves sufridos durante su manejo en el sitio arqueológico. El PMT junto con su base fueron sujetados con un pequeño ángulo de aluminio (ver Fig. 5.7) que evitaba cualquier posible movimiento dentro de la estructura contenedora. Para el mismo fin, también fueron colocadas barras de acrílico de manera



**Figura 5.7** Vista superior del detector centelleador y su electrónica de lectura en la estructura de aluminio.

transversal minimizando así el movimiento del conjunto de detección dentro de la caja de aluminio. Por último, fueron barrenadas las posiciones que tendrían los conectores para alto voltaje y su respectiva señal de salida (tipo BNC) en las barras de aluminio de la citada estructura (Fig. 5.7).



**Figura 5.8** Vista lateral del par de detectores de centelleo ensamblados dentro de sus respectivas estructuras de aluminio.

Finalmente, cada contenedor fue cerrado, atornillado y sellado con cinta adhesiva negra en todos los bordes y aristas de la caja, evitando así el paso de luz al interior de la misma, minimizando así mismo la intromisión de polvo o

agentes externos hacia el detector (ver Fig. 5.8). Un croquis detallado de cada estructura se muestra en el Apéndice I.

## 5.2 Cámara Multialámbrica (Prototipos)

Todos y cada uno de los elementos que conformarían al sistema multialámbrico en conjunto necesitaban haber sido planeados siguiendo un riguroso criterio que englobara, por un lado, la utilización del mayor número de elementos cuya producción fuera nacional, y por el otro, la manufactura de piezas que en su mayoría fueran trabajadas en talleres de la UNAM. Todo esto, por la necesidad de impulsar la creación de técnicas y métodos que ayudaran a mejorar la instrumentación en México.

Construir prototipos representaba una enorme ventaja en cuanto a la utilización de nuevos materiales cuyas propiedades los convertían en candidatos idóneos para ser incluidos en sistemas destinados a operar en lugares con condiciones ambientales extremas. Todo ello con la posibilidad de invertir una cantidad modesta de material y tiempo que mostraría la viabilidad de los diseños expuestos y la eficiencia de los mismos, sin la necesidad de desperdiciar grandes cantidades de elementos durante la construcción final.

En las siguientes secciones se mostrarán las especificaciones, materiales y técnicas empleadas durante la construcción de los distintos elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y de seguridad empleados en la obtención de un sistema multialámbrico para la detección de rayos cósmicos.

### 5.2.1 Materiales

#### *Alambre*

Uno de los elementos fundamentales en un sistema multialámbrico es el tipo y diámetro de alambre que se utilizará para construir el ánodo del detector. De esta decisión dependen una serie de factores que contribuirán a mejorar o empeorar su eficiencia en el momento de operación. La literatura asociada al tema [5, 6, 21, 33, 34] ofrecía numerosos ejemplos en los cuales se mostraban las ventajas de trabajar con alambres cuyos diámetros oscilaban entre los 20 y 25  $\mu\text{m}$ . No obstante, era necesario experimentar con dicho material para conocer las técnicas de manejo que redituaran en un método confiable para su ulterior utilización. Como se vio en la sección 3.2.6, para un menor diámetro

en los alambres, se necesitaría un menor voltaje de operación. Sin embargo, la limitante es la tensión mecánica que pueda soportar un alambre muy delgado, necesaria para disminuir en la medida de lo posible la aparición de una catenaria.

Después de una búsqueda que incluyó empresas a nivel internacional, debido a que en México no existe una línea de mercado con este tipo de producción, encontramos a la empresa *California Fine Wire Company*, que se especializa en la fabricación de alambres con diámetros muy pequeños. Ellos fabrican alambres de distintos materiales y para aplicaciones tan variadas como la de los detectores de partículas, que nosotros necesitábamos implementar. Esta compañía garantiza que el proceso ultra fino con el que producen sus productos da como resultado alambres totalmente lisos, libres de defectos, completamente homogéneos en cuanto al metal utilizado y con diámetro constante (ver Tabla 5.1). La tolerancia que manejan tanto para el diámetro como para la simetría cilíndrica (redondez) es de 0.1 micras.

Dentro del grupo de investigación existía cierta experiencia al trabajar con alambre de Cobre-Berilio y Tungsteno recubierto con Oro. Sin embargo, distintos tipos de alambres fueron sometidos a pruebas de tensión, manejabilidad y soldadura.

Alambre	Nombre Comercial
Tungsteno chapado de Oro	Stablohm 800b (resistance wire)
Aluminio chapado de Oro	Stablohm 675 (resistance wire)
Cobre-Berilio chapado de Oro	Stablohm 650 (resistance wire)
Aluminio vestido de Cobre chapado de Oro	Stainless Steel 302
Molibdeno chapado de Oro	Stainless Steel 304
Titanio chapado de Oro	Stainless Steel 316L
Aluminio chapado de Oro	Stainless Steel 316LVM

**Tabla 5.1** Alambres producidos para la construcción de sistemas multialámbricos.

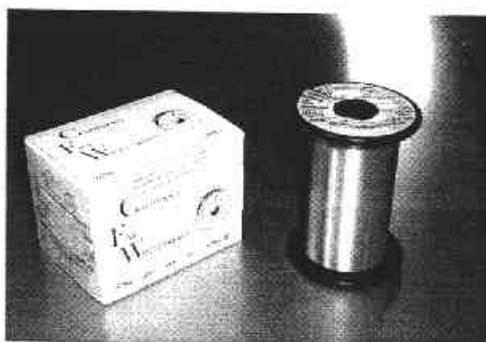
Los resultados se muestran en la Tabla 5.2, siendo el tungsteno recubierto con oro de 25 micras el que mejor respondió a estas pruebas. La citada empresa distribuye su alambre en forma de carretes, y utiliza durante el proceso de empaque la aplicación de una ligera capa de adhesivo o laca a lo largo de una línea encima del rollo de alambre (Fig. 5.9). Esto constituye un elemento a tomar en cuenta en el momento de desenredar el material, debido a que las zonas cubiertas con dicho pegamento son propensas a una leve deformación, en caso de no desenredarlo con sumo cuidado, lo cual provoca pequeñas

grietas (a nivel microscópico) que al aplicar cierta tensión sobre el alambre dañado puede provocar su ruptura.

Alambre	Máxima Tensión soportada (N)	Respuesta a la soldadura
Molibdeno chapado de Oro 25 $\mu\text{m}$	1.08	Mala
Tungsteno chapado de Oro 20 $\mu\text{m}$	0.95	Buena
Tungsteno chapado de Oro 25 $\mu\text{m}$	1.16	Buena
Tungsteno chapado de Oro 50 $\mu\text{m}$	1.35	Regular
Titanio chapado de Oro 20 $\mu\text{m}$	1.11	Mala
Acero inoxidable 25 $\mu\text{m}$	1.45	Mala

**Tabla 5.2** Resultados de las pruebas efectuadas a los alambres propuestos.

En base a las características mostradas por los alambres estudiados se eligió trabajar con el alambre de tungsteno chapado de oro con acabado ultra-fino, por haber sido el que mejores ventajas ofreció al aplicar tensión y soldarlo en distintas superficies, aún cuando su precio no era del todo económico (aproximadamente 1 dólar por metro de alambre).



**Figura 5.9** Carrete de alambre de Tungsteno recubierto con Oro de 25  $\mu\text{m}$  producido por "California Fine Wire Company".

### **Soldadura**

Por lo que respecta al material utilizado para la soldadura, también se experimentó con dos tipos de soldadura comercialmente disponibles en México. La soldadura 60/40 Sn-Pb (60% Estaño, 40% Plomo) es la que menor punto de fusión tiene, siendo éste de 190°C, a la vez que su costo es bajo. Por otro lado, la aleación Sn-Ag(3.5) que presenta un 3.5% de Plata, y 96.5% de

Estaño posee un punto de fusión de 221°C, aunque su precio es elevado (~ 50 dólares por rollo) debido a la Plata contenida.

La prueba realizada a estas aleaciones consistió en soldar alambres de 25 µm (tungsteno-oro) y aplicar gradualmente distintas tensiones hasta el punto que el alambre se desprendiera del punto de soldadura antes de romperse (ver Tabla 5.3). Debido a los resultados obtenidos elegimos utilizar la soldadura comercial 60/40 Sn-Pb, además de su bajo punto de fusión y precio accesible.

Soldadura	Punto de Fusión (°C)	Máxima Tensión (N)	Precio
Sn-Pb	190	1.2	Bajo
Sn-Ag	221	0.9	Elevado

**Tabla 5.3** Principales características de las soldaduras probadas.

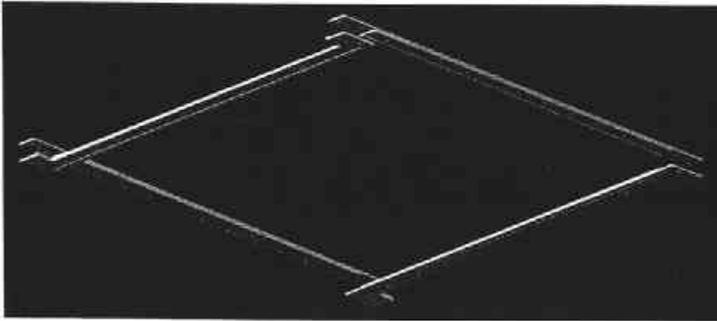
### *Marco del detector*

Hasta el momento no he especificado la forma que tendrían los distintos elementos que conforman al detector multialámbrico. Básicamente, y en términos muy generales, el diseño consideraba 3 piezas o partes fundamentales. El ánodo conteniendo un plano central formado por alambres situados de manera paralela entre ellos, los cuales serían los responsables de detectar la ionización producida por el paso de una partícula a través del mismo, y dos cátodos colocados por encima y debajo del citado ánodo a cierta distancia, que serían los encargados de proporcionar el campo eléctrico necesario para el proceso de detección. En la mayoría de estos sistemas, cuyas dimensiones regularmente no exceden un área de (50x50) cm<sup>2</sup>, es común la utilización de placas de G-10 con un grosor de 1/16" (~ 1.6 mm) [5, 33, 34]. Este material comparte características similares con la fibra de vidrio y el acrílico, y generalmente se produce con una capa de cobre en una o ambas de sus superficies. La geometría empleada en estos casos incluye la utilización de marcos o bastidores que representan la estructura principal del detector, la cual brinda al mismo tiempo un soporte mecánico adecuado dadas las dimensiones del detector, al mismo tiempo que es posible conectar y soldar parte de la electrónica asociada en su superficie.

En nuestro caso, las dimensiones del sistema multialámbrico planeado imposibilitaban el uso de materiales tan delgados y ligeros que no ofrecieran un soporte mecánico confiable a una estructura de 1 m<sup>2</sup> como mínimo. Materiales derivados del plástico o el acrílico presentaban la ventaja de ser ligeros y fáciles de trabajar con herramientas no especializadas o de alto costo, sin embargo, no ofrecían la estabilidad mecánica necesaria para albergar un

sistema de detección cuyo peso aproximado sería de 60 kg o más, además de ser vulnerables a los cambios de temperatura y humedad. Aleaciones hechas a partir de acero brindaban una garantía mecánica en cuanto a la resistencia y durabilidad, aunque el peso mismo de la estructura aunado a la dificultad de trabajar dichos materiales con precisión milimétrica en placas o tramos de aproximadamente un metro en talleres de la UNAM, los convertían en una opción poco viable. Existía también la posibilidad de trabajar con materiales fabricados con fibra de carbono, sin embargo, el elevado costo de las piezas, la dificultad de encontrar comercialmente piezas que excedieran el metro de longitud, y las restricciones y cuidados excesivos al momento de maquinarlos que estos materiales requieren, terminaron por descartarlos de nuestras expectativas.

Finalmente, el aluminio resultó ser el material que cumplió la mayor parte de nuestras exigencias. De todos los metales a nivel comercial a excepción del hierro, el aluminio es el más económico. Además tiene la ventaja de ser ligero, rígido, inmune a la humedad, anticorrosivo, resistente a la acción de sustancias químicas y no es tóxico. El tipo de aluminio elegido es de una especificación conocida comercialmente como T-5. Se caracteriza por tener una gran resistencia mecánica, aspecto de suma importancia para evitar cualquier deformación en la estructura del modelo final, garantizando de esta forma la conservación de una tensión uniforme y constante en los alambres que formarán el ánodo sobre una estructura hecha de este material.



**Figura 5.10** *Diseño modular de las piezas para el ánodo del detector multialámbrico.*

Un reto a vencer en la planeación del sistema de detección en conjunto, era el diseño de una geometría que permitiera maquinarla por completo en los talleres destinados para ello en el Instituto de Física de la UNAM. Una limitante de tipo espacial consistía en la imposibilidad de trabajar placas completas de tales dimensiones como las que implicaba nuestro detector. En

su lugar, se optó por el diseño de piezas que fueran ensambladas por partes a manera de rompecabezas para formar así una estructura rígida de mas de 1 m<sup>2</sup> a partir de secciones longitudinales o postes que una vez armadas entre ellas constituyeran el bastidor completo que contendría al ánodo (ver Fig. 5.10). Uno de los prototipos a escala construidos cuenta con la lógica de ensamble antes expuesta y se detalla más adelante.

### ***Circuito Impreso***

A nivel comercial existen principalmente tres materiales a los que se recurre en lo que a elaboración de circuitos impresos se trata. Las características y precio de cada uno de ellos representan grandes diferencias, ventajas y diferencias que deben considerarse al momento de involucrarlos en un proyecto electrónico. El material a ocupar en nuestro detector debía cumplir con altos estándares de calidad ya que los alambres que conformarían el ánodo serían soldados a esta placa, confiando en ella la estabilidad y operación del sistema multialámbrico.

Habiendo elegido el tipo de soldadura a utilizar, ahora faltaba contar con un material que resistiera el calor aplicado en el proceso de soldadura y que además soportara la tensión mecánica aplicada por los alambres sobre las pistas de cobre adheridas a la base, sin que las mismas se vieran afectadas o degradadas de algún modo por agentes externos. Evitando así la necesidad de reparar pistas dañadas una vez que el detector estuviera terminado.

Los materiales antes mencionados son conocidos por sus siglas como: FR4 (Fibra de vidrio), FR3 (Baquelita) y FR2 (Cartón). De éstos, el FR4 es el más utilizado para el diseño de circuitos en detectores multialámbricos [5, 6, 33, 34].

Además, el FR4 soporta una temperatura de alrededor de 800°F muy superior a la que soportan los otros materiales, y que también está por encima de la temperatura que se aplicó con nuestro caudín (alrededor de 600°F). También posee una amplia rigidez por tener capas de fibra de vidrio perpendiculares entre sí de manera que aunado a la capa de cobre y al espesor total de 1/16 ", el material presenta una buena resistencia mecánica. El costo del FR4 es superior al del resto de los materiales, aunque debe tenerse en cuenta las óptimas características con las que cuenta, las cuales propiciaron que también optáramos por este material al momento de construir los cátodos con los que contará la cámara multialámbrica.

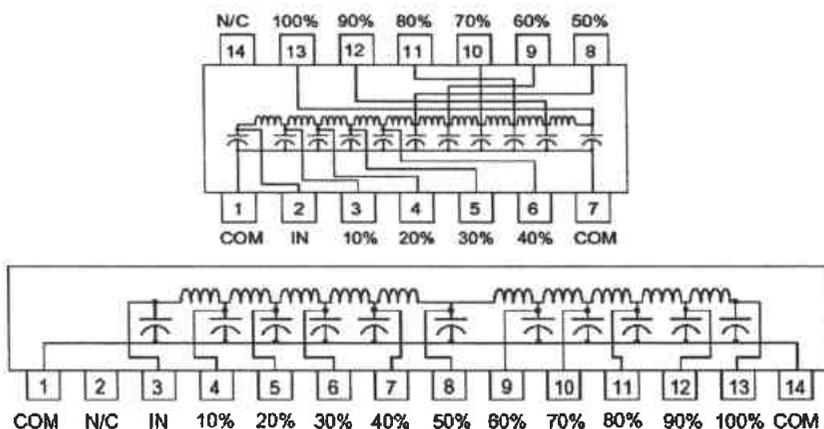
## ***Líneas de Retardo***

Como se vio en la sección 3.2.8, el método de lectura escogido para este detector sería el de retraso de tiempo por interpolación. Un elemento clave para la exitosa instrumentación de esta técnica se basa en la correcta operación de los componentes destinados a retrasar temporalmente la señal asociada a un evento. Para ello es necesario que la señal sufra la menor distorsión posible, y que además el acoplamiento de impedancias entre esta serie de módulos y la electrónica subsecuente sea tal que no altere las características de amplitud y frecuencia.

Comercialmente existe una gran variedad de líneas de retardo o *delay lines* diseñadas para numerosas aplicaciones. En nuestro caso, buscábamos que los elementos fueran módulos pasivos, es decir, que no consumieran energía eléctrica extra, recordando las limitaciones que se tendrán en el sitio arqueológico. Además era necesario que su geometría, dimensiones y características de encapsulado permitieran su inclusión en el mismo circuito del ánodo sin presentar complicaciones de tipo mecánicas o electrónicas.

Debido a que se trabajará con señales retrasadas en tiempo, era importante que este retraso fuera lo más constante posible, asegurando de esta forma el mismo retardo entre cada uno de los alambres que conformarían al ánodo. En función del error intrínseco que cada retraso presente respecto a su valor nominal, podremos tener una mayor precisión al momento de determinar la posición en que incidan las partículas ionizantes.

Nuevamente, después de una búsqueda que incluyó varias compañías extranjeras, optamos por los productos que ofrecía la empresa *Rhombus Industries Inc.*, que cumplían todas nuestras exigencias. Para el caso del primer prototipo elegimos *delay lines* con retardo entre cada *tap* de 50 ns (modelo *TYB98-5*), mientras que para el detector de 1 m<sup>2</sup> escogimos retardos de 4 ns por *tap* (modelo *SIP5-405*), cada uno con 14 pines, ver Apéndice II. Esta última decisión obedecía a limitaciones de tipo instrumental asociadas con la lectura planeada. La implementación de alrededor de 200 alambres con una separación aproximada de 5 mm en una longitud de 1 metro daba como resultado un retraso total aproximado de 800 ns, lo que representaba el máximo intervalo del convertidor de tiempo a señal digital (TDC) planeado para el experimento. Mientras que la geometría de cada modelo (ver Fig. 5.11) preferimos probarla experimentalmente en cada prototipo, antes de elegir la que más convenía a los diseños planeados.

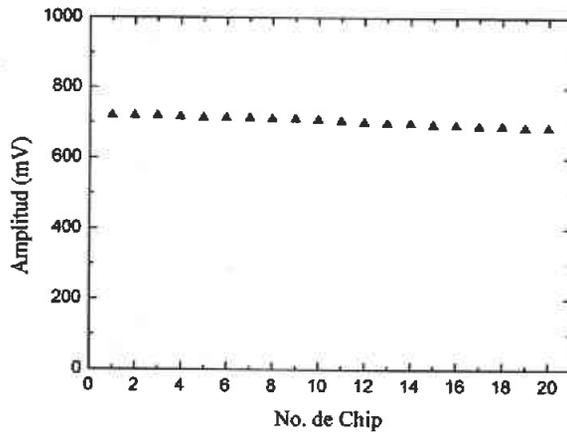


**Figura 5.11** Diagrama electrónico y geometría de los módulos de retardo elegidos. En la parte superior aparece el modelo TYB98-5, y en la parte inferior el modelo SIP5-405.

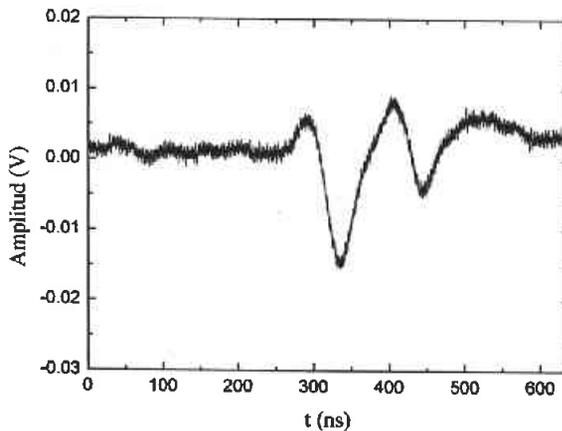
Un factor importante a considerar cuando se utiliza este tipo de módulos, es la atenuación intrínseca provocada por cada elemento de retardo. Debido a las dimensiones que tendría el detector, decidimos cuantificar la magnitud de este comportamiento en cada una de las *delay lines* adquiridas. Los resultados obtenidos mostraron una atenuación máxima del 5% después de 20 módulos de retardo conectados en serie, que significaban 200 etapas de retardo (ver Fig. 5.12). Por lo cual, sabíamos que la implementación de tales módulos en serie a lo largo del detector final era viable.

Otra característica importante de las *delay lines* elegidas era su impedancia de 50  $\Omega$ , la cual se acoplaba de manera correcta con la impedancia estándar del resto de la instrumentación electrónica con la que se contaba. Cabe mencionar que un mal acoplamiento entre dichas impedancias provoca, entre otros problemas, la aparición de reflexiones en la línea de lectura final del sistema, la cual es detectada como un pulso más del detector cuando en realidad se trata de un evento espurio, cuya separación temporal respecto a la señal real algunas veces es un múltiplo del retardo total del detector.

En la figura 5.13 puede observarse una señal retrasada con un elemento de retardo, el cual no contaba con la misma impedancia que el resto de la electrónica de lectura, lo que provocó la aparición de un pulso espurio cuya separación temporal es de 108 ns, que representa el triple del retardo total (36 ns) del detector prototipo B (ver sección 5.2.2.2).



**Figura 5.12** Medida de la atenuación en la amplitud para una señal a través de 20 elementos de retardo.



**Figura 5.13** Señal retardada con reflexión debida a un mal acoplamiento.

### Gas

Uno de los factores que más cuidado exigía era la búsqueda, experimentación y elección del gas con el que habría de trabajar el sistema multialámbrico. Varios factores de seguridad se anteponían a variables tales como

disponibilidad en el mercado, facilidad de manejo y eficiencia. Tales precauciones eran necesarias debido a las precarias condiciones existentes en el sitio arqueológico donde sería destinado el detector. Una de las principales preocupaciones era la volatilidad y cuán flamable podría resultar la mezcla a utilizar, ya que desde la cueva hacia el exterior existe un túnel de difícil acceso con aproximadamente 100 metros de longitud, lo cual imposibilitaba por completo la implementación de zonas de ventilación o cualquier tipo de instalación de emergencia en caso de un posible siniestro provocado por sobrecalentamiento, corto circuito o descargas ocasionadas por el alto voltaje.

Las mezclas comúnmente utilizadas presentan entre sus componentes la inclusión de gases nobles, que aparte de económicos, presentan buenas condiciones para la generación de pares ión-electrón [5]. Entre los más usados se encuentra el Argón.

Así mismo, existen gases inorgánicos como el Isobutano, Metano y Propano que igualmente brindan buenos resultados [33, 34]. Desgraciadamente estas mezclas son difíciles de conseguir en México con el grado de pureza requerido, son costosos y el tiempo de preparación y entrega puede exceder los 2 meses. De entre esta familia de gases existe sin embargo el bióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) que resulta muy eficiente para la captura de fotoelectrones y su costo de preparación no es tan alto. Experimentalmente en la utilización de sistemas multialámbricos se reportan [35] resultados satisfactorios al utilizar mezclas de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  (20%, 80%) y del gas conocido como P-10 hecho a base de Metano-Argón (10%, 90%).

En nuestro país, la empresa *INFRA* cuenta entre su producción con la existencia de las dos últimas mezclas citadas. Las características flamables del P-10 no lo hacían buen candidato para su utilización dentro de un túnel sin las debidas instalaciones y medidas de seguridad, además que su precio por carga (\$ 2,350) era superior al de la mezcla de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  (\$ 1,200 ambos precios del 2002). De esta manera, se optó por usar este último gas con la especificación de mezcla certificada *Welder C-2* contenido en un cilindro de acero al carbón recargable modelo "B", con un contenido de  $6 \text{ m}^3$  y a una presión de 2000 psig. Otra razón para elegir el  $\text{CO}_2\text{Ar}$  estribaba en el hecho de que debido a que el detector completo está planeado para operar las 24 horas durante aproximadamente un año en Teotihuacan, el flujo de gas en su interior será bombeado a presión atmosférica y de manera constante, por lo que se estima que un tanque en esas condiciones de trabajo dure aproximadamente 2 meses. En consecuencia, la utilización de gases cuyo precio sea elevado y a la vez presenten características muy flamables, se contraponen con las exigencias de nuestro proyecto.

## ***Máquinas y herramientas a nuestra disposición***

El desarrollo de un dispositivo de detección con las expectativas y condiciones descritas hasta ahora, proponía el empleo de distintas técnicas y métodos para manufacturar y obtener cada uno de los elementos que conformarían al sistema final. Afortunadamente, el Instituto de Física de la UNAM contaba con una vasta infraestructura que posibilitaba la correcta realización de este trabajo.

Primeramente se contó con el apoyo del personal del departamento de electrónica, de los cuales se recibió asesoría y ayuda en todo lo referente a la obtención de los circuitos impresos utilizados durante el proyecto, mediante la técnica de fotogrado.

Para la soldadura de los distintos componentes que conformarían al sistema multialámbrico se eligió un cautín tipo estación de trabajo *Weller* modelo *WES-50* con potencia de 50 W y temperatura variable entre 350 y 850°F. La punta utilizada era modelo *PES-50*, la cual se eligió después de experimentar la aplicación de soldadura con distintas puntas y geometrías disponibles en el mercado. Puntas extremadamente delgadas no conseguían derretir la soldadura, consecuentemente se necesitaba aumentar la temperatura en la misma, ocasionando el desprendimiento de la cubierta de oro del alambre, así como su inminente ruptura.

Para la construcción de piezas grandes que requerían una gran precisión, contábamos en el taller principal del instituto con la existencia de una máquina de control numérico computarizada que permitía la elaboración de piezas de hasta 1.2 metros de longitud con una tolerancia de 0.05 mm. Esta herramienta de precisión serviría para manufacturar las piezas de ensamble para la estructura de la cámara multialámbrica. La versatilidad de esta máquina haría posible la construcción de piezas en aluminio, acrílico, lucita y fibra de vidrio, indispensables para el buen funcionamiento del detector. Cabe mencionar que los diseños a realizar con este dispositivo computarizado necesitaban elaborarse mediante el uso del software *Autocad*, lo cual brindaba además la valiosa oportunidad de ensamblar y armar virtualmente cada una de las piezas en un espacio tridimensional antes de su construcción.

Finalmente, para la obtención de piezas de distintos materiales cuya tolerancia de diseño no fuera tan estricta, se contaba con un taller equipado con numerosas máquinas y herramientas de tipo mecánico que se utilizarían para cortar, devastar, alinear, pulir, adherir, moldear, barrenar y ajustar los elementos destinados a todo el sistema de detección.

## 5.2.2 Construcción de prototipos

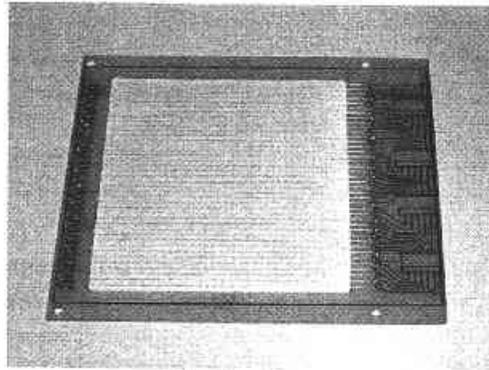
Generalmente la forma como son desarrolladas las cámaras multialámbricas destinadas a experimentos de física nuclear o de altas energías obedece a la prioridad de diseño impuesta por el destino final de operación de dichos aparatos. Por lo regular, la mayoría de dichos sistemas son planeados para detectar partículas bajo condiciones controladas en situaciones donde imperan prioridades de tipo estadístico o de conteo, buscando así obtener detectores con la mejor respuesta posible y con la menor cantidad de variables externas que puedan afectar el correcto funcionamiento de los mismos.

Debido a ello, en una primera etapa optamos por construir prototipos del detector multialámbrico, como se describe a continuación.

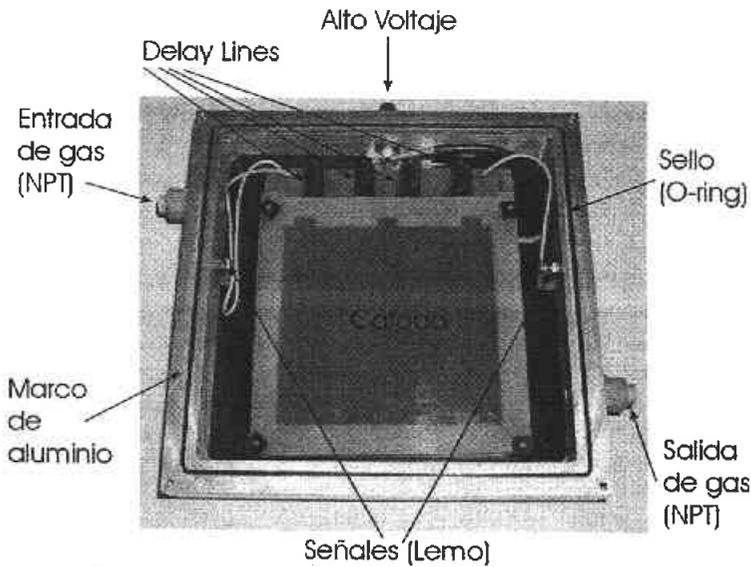
### 5.2.2.1 Prototipo A

Las variables más importantes a probar en el primer prototipo elaborado eran: la calidad y diámetro del alambre, la técnica de soldadura, el gas a utilizar y el método de lectura electrónico elegido. Además de comprobar la posibilidad de construir una cámara multialámbrica de mayor área que las diseñadas hasta ese momento en el Instituto de Física [33]. Para tal fin se elaboró un ánodo utilizando FR4 con área efectiva de  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ , y 40 alambres de Tungsteno-Oro de  $25 \mu\text{m}$  soldados con una tensión de 1.14 N, con separación entre ellos de 2.54 mm (ver Fig. 5.14). La tensión escogida obedeció a los valores reportados para dicho material en la literatura [5]. Donde el circuito impreso se realizó mediante fotograbado y se utilizaron módulos electrónicos comerciales *Rhombus* modelo *TYB98-5* para el retardo temporal de 50 ns entre cada alambre. Cabe mencionar que este retraso coincidía con los intervalos temporales del digitalizador que en un principio usaríamos para estudiar las señales. El diagrama del circuito electrónico propuesto e instrumentado para este detector puede consultarse en el Apéndice III.

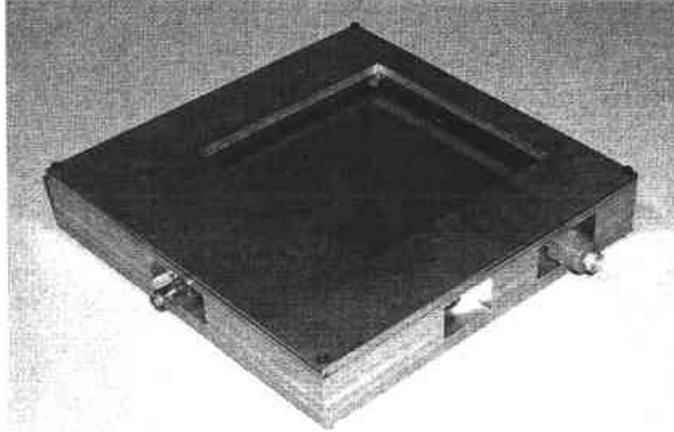
En el prototipo "A" dadas sus dimensiones, fue posible construir la estructura que soportaría los alambres y el circuito electrónico asociado en una misma pieza. Esto fue pensado con la finalidad de separar el ánodo de sus respectivos cátodos (colocados uno encima y otro por debajo) variando la distancia con cuatro tornillos de lucita situados en las esquinas, para medir la respuesta y comportamiento del detector en cada caso (ver Fig. 5.15).



**Figura 5.14** Vista superior del ánodo construido con 40 alambres de Tungsteno-Oro de 25  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.15** Vista superior del detector prototipo "A", donde se observan sus principales componentes.



**Figura 5.16** *Aspecto del detector cerrado, donde puede observarse la ventana de mylar sobre el área activa.*

Cabe mencionar que los cátodos también fueron construidos con FR4 y en ellos fue retirada la capa de cobre de las orillas dejando únicamente una sección cuadrada que correspondía al área de la ventana efectiva de detección en el ánodo de  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ , y que serían los elementos donde se aplicaría el alto voltaje.

Las dimensiones de este detector fueron las idóneas para construir una caja de aluminio que incluyera los conectores para la entrada y salida de gas (tipo NPT), el conector de alto voltaje (tipo BNC-SHV) y dos conectores (tipo lemo) que recibirían las señales izquierda y derecha de la cámara. Así mismo, fue posible “encapsular” al detector construyendo tapas de aluminio con un grosor de  $1/4$ ”, donde la pieza superior fue diseñada con un orificio cuadrado (Fig. 5.16) en el que sería colocada una ventana de *mylar* de  $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  que permitiera el paso de partículas  $\beta$  de  $^{90}\text{Sr}$ . En el ánodo de este primer prototipo se soldó un “alambre de guarda” en cada extremo de la región activa del detector, que no participaba en el retraso de las señales y cuyo diámetro ( $50 \mu\text{m}$ ) era mayor al del resto de los alambres. La finalidad de estos alambres de guarda es la de minimizar las fluctuaciones de las líneas del campo eléctrico existente en los bordes del área de detección.

Los resultados obtenidos con este detector, que serán explicados más adelante, mostraban un buen funcionamiento respecto a sistemas construidos anteriormente en el grupo de investigación. Esto nos dio la pauta para implementar un segundo y último prototipo con todas las características que tendría el detector final.

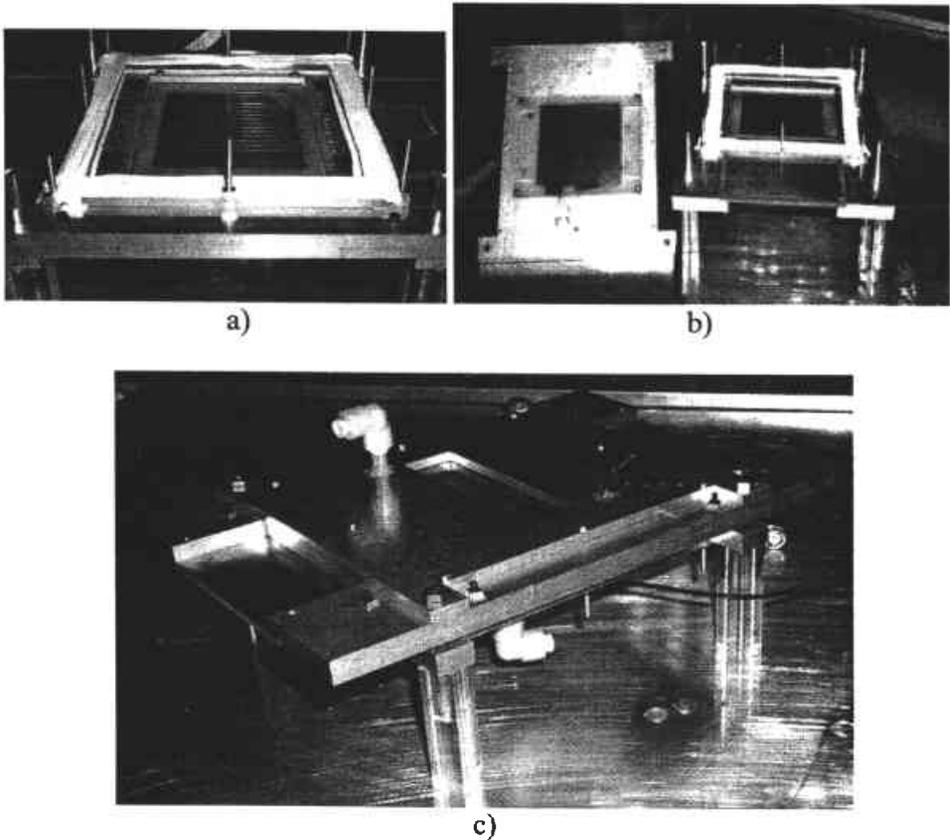
### 5.2.2.2 Prototipo B

Habiendo cubierto las expectativas de funcionamiento y operación mediante la instrumentación del primer prototipo, sabíamos las principales características que debía cumplir el detector de  $1 \text{ m}^2$ . Un aspecto importante del prototipo *A* era la limitante de volver escalable el diseño del ánodo. La razón obedecía a la imposibilidad de construir en una sola pieza un circuito de más de  $1 \text{ m}^2$ . Además, el material para circuitos (FR4) que hay en México es tan delgado ( $\sim 2 \text{ mm}$ ), que la tensión de casi 180 alambres lo deformaría. Por lo que la principal inquietud respecto a la construcción del siguiente prototipo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  era el desempeño de una estructura de aluminio “armable”, la cual tendría que ser escalable para el detector final. De esta manera, necesitábamos probar la pieza completa para rastrear las posibles ineficiencias mecánicas o eléctricas que ésta podría presentar durante la operación del detector multialámbrico.

Para dicho fin, se planeó la construcción de un segundo prototipo que tuviera todas las implementaciones mecánicas, eléctricas y electrónicas, destinadas a incluir en el detector grande. Cabe señalar, que la instrumentación electrónica de este segundo prototipo estuvo a cargo del estudiante Edgar Vázquez, cuyos resultados constituyeron su tesis de licenciatura [36].

Este detector fue construido en aluminio T-5, con las especificaciones de diseño necesarias para ensamblar las cuatro piezas que constituían el marco, destinado a formar la estructura del ánodo que soportaría la tensión de los alambres, soldados con una distancia entre ellos de  $5 \text{ mm}$  (Fig. 5.17). El área efectiva de detección fue de  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ . En cuanto a la distancia ánodo-cátodos, la experiencia de trabajar con el prototipo *A* nos mostró, entre otra información importante, que la configuración eléctrica más estable, sin necesidad de incrementar demasiado el potencial, indicaba la conveniencia de separar los cátodos  $5 \text{ mm}$  respecto al ánodo central.

En esta ocasión, debido a su óptima geometría y adecuado retardo para el detector grande, se utilizó un *delay line* modelo *SIP5-405* con retraso temporal de  $4 \text{ ns}$  por *tap*, instrumentando 9 alambres activos y 3 alambres de guarda por lado, con diámetros de 100, 50 y  $25 \mu\text{m}$  respectivamente, empezando por el alambre exterior. El retraso temporal elegido obedeció a razones de tipo instrumental, ya que para el detector final se contaba con un convertidor de tiempo a señal digital (TDC) con un intervalo de  $800 \text{ ns}$ , por lo que para 180 alambres, el retraso aproximado era de  $4 \text{ ns}$  por elemento ( $\sim 720 \text{ ns}$ ). Cabe señalar, que a partir de este detector, todas las piezas y

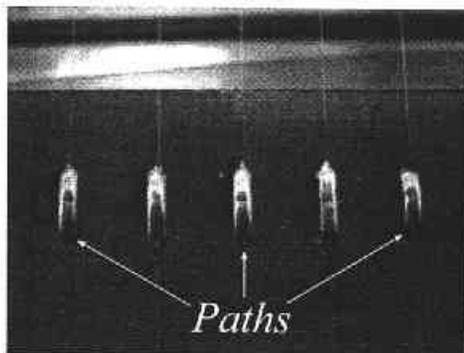


**Figura 5.17** a) Vista lateral del ánodo y cátodo inferior, armados en la estructura de aluminio. b) Vista frontal del cátodo superior y del detector terminado. c) Cámara multialámbrica cerrada. Puede observarse el chip de retraso temporal en el extremo superior derecho.

componentes eléctricos y electrónicos eran soldados, ensamblados y conectados dentro de un área cubierta con plástico de piso a techo con un área aproximada de  $(2 \times 2) \text{ m}^2$  y que en adelante llamaremos “área limpia”, cuyo objetivo era impedir la intromisión de polvo, asegurando de esta forma circuitos libres de impurezas macroscópicas. El diagrama electrónico de este detector aparece en el Apéndice IV.

Así mismo, en este ánodo se diseñaron *paths* o puntos de sujeción y contacto electrónico para los alambres de Tungsteno-Oro con forma ovalada y longitud de 1 cm (ver Fig. 5.18), los cuales ofrecieron una geometría y dimensiones adecuadas al momento de soldar los citados alambres, nuevamente con una tensión de 1.14 N, de acuerdo con los valores

recomendados en la bibliografía antes citada [5]. En lo que respecta al circuito incluido para los cátodos, éste contaba únicamente con una resistencia de  $4\text{ M}\Omega$  en serie como elemento de seguridad para minimizar el paso de corriente eléctrica en caso de una descarga al interior del detector, tomando en cuenta un voltaje máximo de operación  $\sim 2500\text{ V}$ . Las implementaciones y enseñanza adquirida tras la instrumentación, operación y distintos ajustes de los que este prototipo fue objeto sirvieron de base, junto con lo aprendido al operar el prototipo *A*, para construir la cámara multialámbrica de  $1\text{ m}^2$ , cuyo desarrollo y detalles se exponen a continuación.



**Figura 5.18** *Puntos de sujeción (paths) de 1 cm con alambres soldados.*

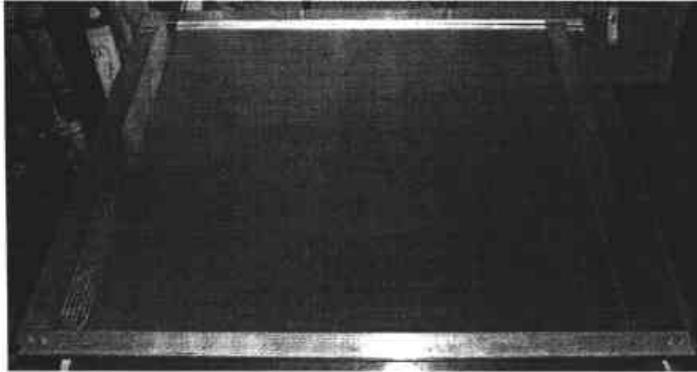
### 5.3 Cámara multialámbrica (Final)

En base a la experimentación de diseño y construcción en los prototipos *A* y *B*, conocíamos las principales características que el detector de  $1\text{ m}^2$  debía cumplir para presentar una operación adecuada. La construcción de dicha cámara final se describe a continuación.

#### 5.3.1 Ánodo

La estructura destinada a albergar el circuito electrónico de lectura y soportar la tensión de aproximadamente 180 alambres, fue construida en aluminio T-5 con la misma lógica de ensamble discutida anteriormente. El bastidor contaba con 4 piezas maquinadas de manera independiente que al armarlas, formaban un marco ligero y resistente con un área de  $(1.10 \times 1.20)\text{ m}^2$ . La pieza en conjunto, ofrecía una geometría que primeramente respetaba las dimensiones máximas permisibles para su colocación en el sitio arqueológico subterráneo

de la Pirámide del Sol, y además, incluía dentro de su diseño todas las especificaciones necesarias para su ulterior operación como detector de muones. Cabe mencionar, que las piezas fueron diseñadas para unir las entre sí, para después atornillarlas y pegarlas con resina epóxica en las uniones de las esquinas evitando así pérdidas de gas.



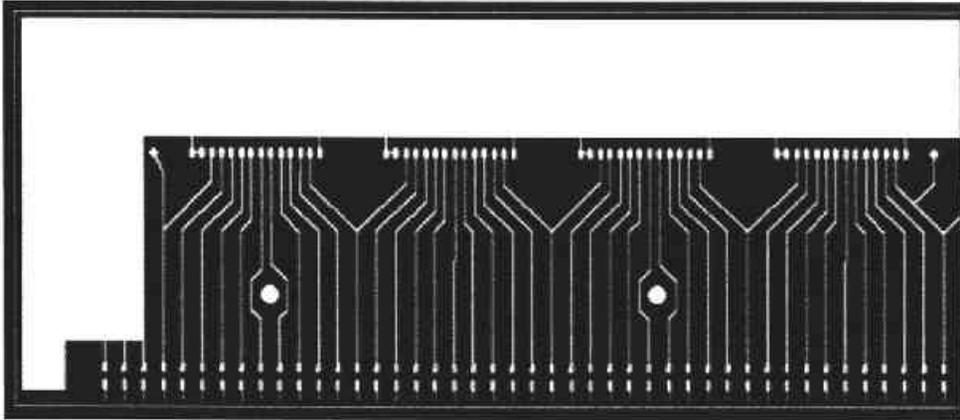
**Figura 5.19** Vista superior de la estructura de aluminio que soporta al ánodo del detector multialámbrico.

Para minimizar el escape de gas desde el interior de la cámara al momento de su operación, la estructura de aluminio contaría con sellos cilíndricos de goma conocidos como *O-ring* (ver Fig. 5.20), cuyo diámetro era de 1/16 " y serviría para lograr un sellado completo entre la superficie de aluminio y las tapas del detector. Los planos de dicha estructura pueden consultarse en el Apéndice V.

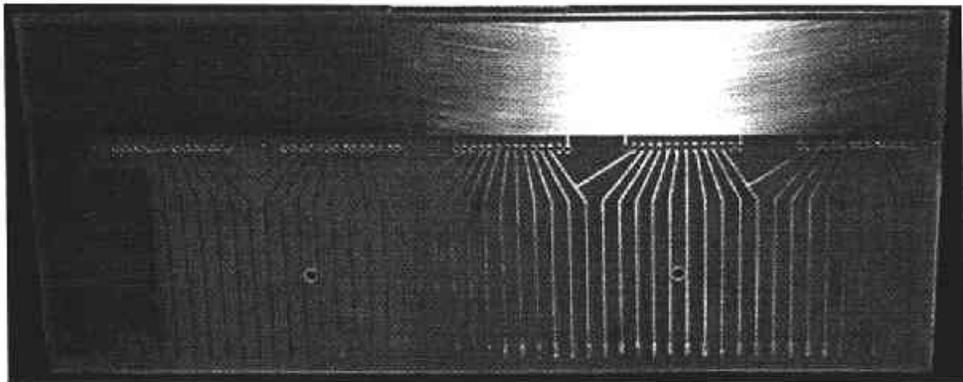


**Figura 5.20** Sello cilíndrico de goma (*O-ring*) utilizado en la estructura de aluminio.

El siguiente elemento fundamental del ánodo era el FR4 fotograbado con un grosor de 1/16", que incluiría el circuito electrónico junto con los elementos de retardo y las guías o *paths* para soldar los alambres con una separación de 5 mm y un error estimado en la posición relativa de  $\pm 4\%$  (considerando que las líneas guía son de 100  $\mu\text{m}$  y todos los alambres están contenidos en el ancho de las mismas).



**Figura 5.21** Sección del dibujo correspondiente al circuito impreso diseñado para el ánodo. Pueden observarse los espacios destinados para los delay lines, así como las posiciones para los barrenos.



**Figura 5.22** Sección de circuito impreso elaborado en FR4.

Cabe mencionar que dicho circuito, junto con todas sus especificaciones fue elaborado con el software *Protel DXP*. Un reto más a vencer en el diseño y

elaboración del mismo estaba constituido nuevamente por las dimensiones que presentaba (1 m). Para ello, fue necesario seccionar el circuito completo en 4 piezas por lado debido a las imposibilidad del taller de electrónica para realizar circuitos de mas de 25 cm. Dichas piezas (ver Fig. 5.22) posteriormente serían unidas mecánica y electrónicamente. Una vez terminadas, barrenadas y ajustadas las secciones del ánodo, éstas fueron alineadas y pegadas al marco de aluminio utilizando resina epóxica, cuyas características químicas no contaminan la atmósfera interna del detector.

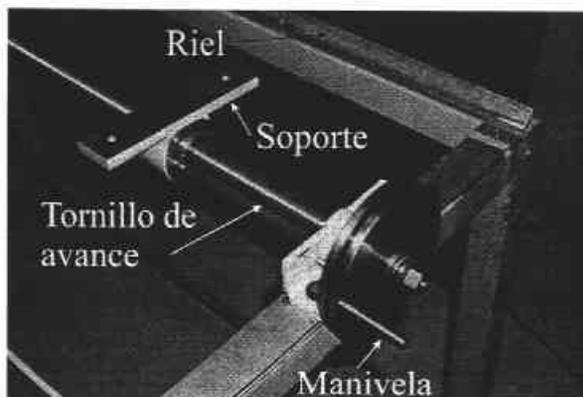
Para el resto del proceso de construcción, alambrado y ensamble, fue necesario construir una segunda “área limpia” de mayor área que la anterior, para evitar la intromisión de polvo al interior de la misma, elaborada con plástico y colocada desde el piso hasta el techo del laboratorio (Fig. 5.23). Esta opción resultaba de gran importancia, debido a los problemas de descarga y chispas en ánodos y cátodos provocadas por polvo y diminutos trozos de varios materiales (pelusas) con los cuales nos habíamos enfrentado durante la operación de los prototipos.



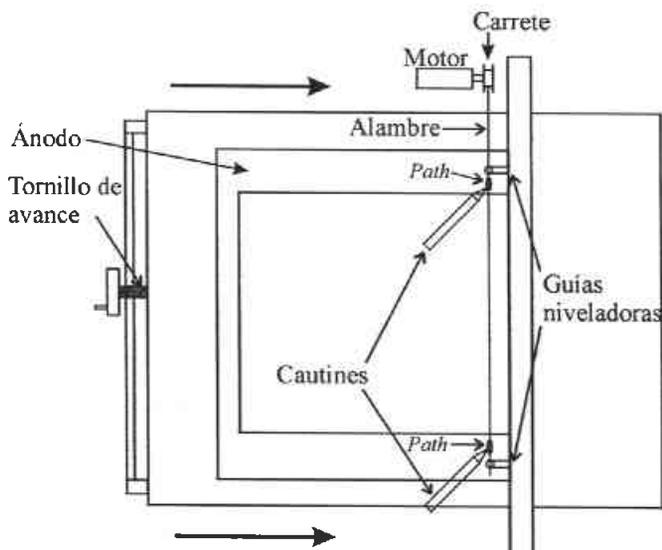
**Figura 5.23** Vista parcial del “área limpia” construida. En su interior se encuentra la mesa diseñada para el proceso de alambrado.

En dicho espacio, de aproximadamente  $(3 \times 5) \text{ m}^2$ , se contaba con una mesa, en cuyo diseño participé junto con el grupo de trabajo, pensada para soldar cada uno de los alambres del ánodo. El sistema consistía en una base de aluminio deslizable a través de un mecanismo compuesto por un tornillo de avance muy preciso, que permitía mover la superficie completa de la mesa en distancias

discretas (ver Fig. 5.24). Para el proceso de alambrado, donde se tendrían que soldar 185 alambres de un metro de longitud, fue diseñado un sistema que incluía la mesa de avance discreto antes mencionada, además de un motor de torque constante, junto con un par de guías mecánicas niveladoras. Para soldar



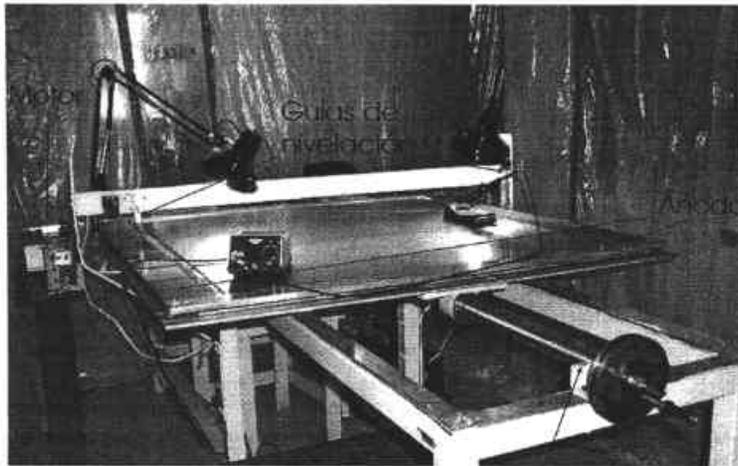
**Figura 5.24** Vista lateral de las piezas del sistema de avance en la mesa encordadora.



**Figura 5.25** Esquema del proceso de "tejido" realizado para el ánodo del detector.

cada alambre con tensión de 1.14 N, eran necesarios los siguientes pasos (ver Fig. 5.25). Enrollar previamente cierta cantidad de alambre (~ 30 m) en el

carrete montado en el eje del motor. Calibrar el mismo con un peso de 116.3 g variando la corriente suministrada hasta estabilizar la torque (asegurando así una tensión de 1.14 N). Alinear la posición de las guías niveladoras, el alambre y el paso de la mesa deslizadora, respecto a los *paths* de los circuitos impresos de ambos lados, para garantizar un avance paralelo y constante de 5 mm (Figs. 5.26 y 5.27). Fijar el extremo del alambre en el lado opuesto a donde se encuentra el motor ejerciendo la presión, mediante cinta adhesiva, para bajar y alinear el alambre, soldándolo al correspondiente *path*. Bajar y alinear el resto del alambre para aplicar el segundo punto de soldadura. Finalmente, una vez apagado el motor, se cortan los excedentes de alambre.



Tornillo de avance

**Figura 5.26** Vista lateral del sistema implementado para soldar los alambres del ánodo.

Para este ánodo se soldaron 3 alambres de guarda por lado (Tungsteno-Oro), cuyos diámetros eran de 100, 50 y 25  $\mu\text{m}$ , empezando por el alambre externo. La tensión asociada para cada diámetro se obtuvo a través de una extrapolación lineal a partir de los datos existentes (ver Tabla 5.2).

Estos 6 alambres, en total, no participan en el proceso de retardo temporal, por lo que sus respectivas terminaciones electrónicas están conectadas a la tierra del ánodo, constituida por la amplia región de cobre de cada circuito (Fig. 5.22). Una vez alambrado el ánodo completo, se soldaron en las respectivas posiciones del circuito, bases para *chip* con la geometría de las *delay line*. Esto con el objetivo de poder intercambiar fácilmente módulos

de retardo descompuestos o dañados sin la necesidad de soldar nuevamente en la superficie del ánodo.



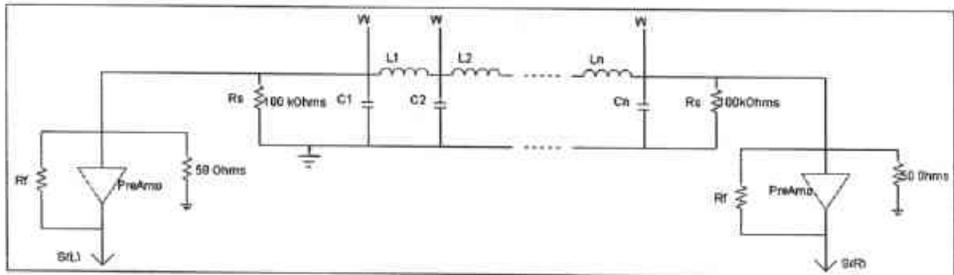
**Figura 5.27** Proceso de alambrado del detector, donde aparecen los elementos involucrados.

Las principales características del diseño del circuito electrónico de lectura fueron resultado de las pruebas realizadas con los prototipos. Por esto, la configuración final de este circuito cumple con necesidades instrumentales tales como:

- a) Buen acoplamiento de impedancias entre la línea completa de retardo y los elementos sensibles a la carga (preamplificadores)
- b) Mínimo nivel de ruido en las señales generadas por el detector multilámbrico
- c) Aislamiento electrónico para evitar la intromisión de señales espurias
- d) Optimización de conexiones de toda la estructura a la tierra física
- e) Resistencias de seguridad destinadas a proteger la integridad del circuito ante posibles chispas o descargas eléctricas en ánodo y cátodos
- f) Obtención de un sistema robusto y confiable destinado a operar bajo condiciones no controladas de temperatura, humedad, radiación de fondo, ruido eléctrico externo y fluctuaciones de corriente al interior del detector.

En la Figura 5.28 aparece el diagrama del circuito electrónico, que corresponde a las cuatro secciones que contienen a los alambres (W) y a los 19 módulos *SIP5-405* con retardo temporal de 4 ns por *tap* (que en el diagrama

aparecen como parejas de capacitores e inductores). Mientras que las restantes 4 secciones opuestas a las primeras, únicamente incluyen los *paths* aislados para cada alambre (ver Fig. 5.27). Cabe señalar que los preamplificadores sensibles a la carga (que posteriormente serán descritos) no formaban parte del circuito del ánodo construido, su inclusión obedece a la completez del diagrama.



**Figura 5.28** Diagrama electrónico del circuito implementado en el ánodo del detector para la instrumentación de 179 alambres.

Al final de cada extremo de la línea de retardo se incluyó una resistencia de 100 k $\Omega$ , cuyo valor en paralelo de 50 k $\Omega$  era muy superior a la impedancia de la línea de retardo. Dicho valor se recomienda sea al menos 10 veces mayor a los 50  $\Omega$  de los *delay line*, garantizando con ello un buen acoplamiento de impedancias, minimizando así la aparición de reflexiones en las señales durante la lectura [37].

Las conexiones del área de tierra del ánodo hacia la estructura de aluminio jugaban un papel importante, debido a las dimensiones, tanto de los cátodos que serían conectados, como de la estructura metálica misma, ya que en caso de no aterrizar bien los correspondientes elementos, estaríamos expuestos a efectos capacitivos de componentes de 1 m<sup>2</sup>, además de la generación de pequeñas corrientes espurias en todo el volumen de la cámara multialámbrica. Para evitar tales anomalías eléctricas, se unieron entre sí con pequeños cables soldados a las regiones de tierra de cada una de las 8 secciones (4 por lado), que después serían conectadas con cables caimán-caimán a los tornillos de 3/16 " de cada una de las esquinas del marco de aluminio para aterrizarlas a estructuras metálicas del laboratorio.

La uniformidad del circuito impreso respecto a la estructura de aluminio se consiguió limando las mínimas secciones protuberantes existentes en el FR4, para después aplicar resina epóxica, con la finalidad de "resanar" la diferencia milimétrica de altura entre las citadas superficies. Esto evitaría el

escape de gas del volumen del detector una vez que éste se encontrara cerrado, garantizando la uniformidad en la unión de ambos materiales.

Los extremos de la línea de retardo completa fueron terminados con conectores y cable *lemo* del tipo RG-174/U con una impedancia de  $50 \Omega$ , los cuales serían conectados durante la instrumentación a sus respectivos preamplificadores.

Para evitar la posibilidad de descargas o arqueamiento eléctrico entre los alambres y los cátodos hacia el marco de aluminio, decidimos forrar el interior de dicha estructura con cinta *kapton*, la cual es utilizada ampliamente en sistemas eléctricos y electrónicos expuestos a alto voltaje. Las características de este material le permiten adherirse a casi cualquier superficie aislando potenciales de hasta 8000 V. Cabe mencionar, que esta cinta también fue usada en todas las secciones con ángulos pronunciados o esquinas expuestas, como fue el caso de los cátodos, cuyo proceso de construcción se describe a continuación.

### 5.3.2 Cátodos

Los elementos metálicos destinados a distribuir el alto voltaje dentro del detector debían ofrecer una superficie de  $1 \text{ m}^2$  con una uniformidad en el material cuya diferencia superficial no excediera 0.05 mm en toda el área de detección. Esto con el fin de evitar deformaciones en las líneas del campo eléctrico generado, y disminuir la probabilidad de variaciones eléctricas drásticas en el detector. El material elegido para dicha tarea consistió nuevamente en placas de FR4 con un grosor de  $1/16$  " y un área de  $(99 \times 99) \text{ cm}^2$ , cuyo costo, facilidad de manufactura y conductividad en la superficie de cobre, lo convertían en la opción más práctica.

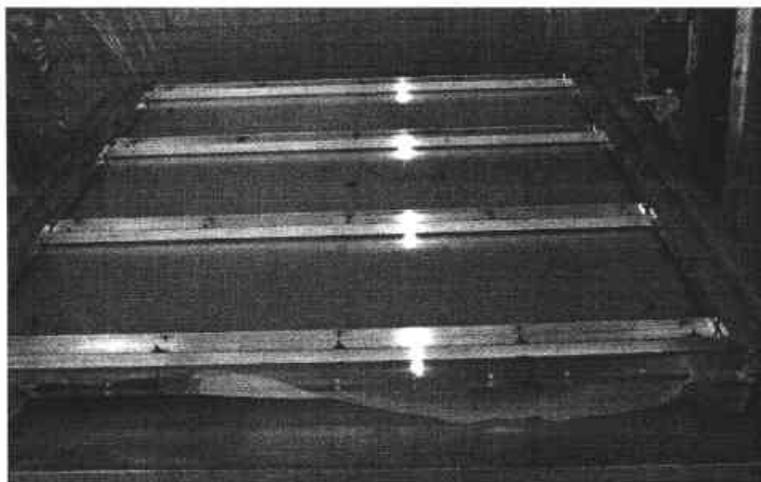
En esta ocasión no fue necesario utilizar ninguna técnica propia para la elaboración de circuitos impresos, ya que el área cuadrada necesaria para su implementación como cátodo, se obtuvo al desprender tiras de cobre de 2 cm de ancho en las orillas del material citado, utilizando el caudín a su máxima temperatura sobre el mismo y retirándolo con pinzas.

En la figura 5.29 se aprecia la forma como quedó armado el cátodo inferior, donde puede apreciarse la cinta *kapton* que cubría 5 mm de cobre en toda la orilla. Dicha cinta también fue adherida en los costados internos del marco de aluminio. La uniformidad y rigidez con las que dichas placas debían contar fue proporcionada por placas de acrílico de 1 cm de grosor adheridas en la parte posterior de los cátodos, que además servirían como las tapas superior e inferior del detector multialámbrico. Cabe señalar que para la tapa inferior, el cátodo fue pegado con cinta adhesiva doble-cara de 1 pulgada de ancho a

una base de acrílico de 7.5 mm de espesor con la finalidad de que al adherir ambas piezas a la citada tapa, con la misma cinta, existiera una distancia entre los alambres y el cátodo de 5 mm.



**Figura 5.29** Vista superior del ánodo y cátodo inferior del detector multialámbrico.

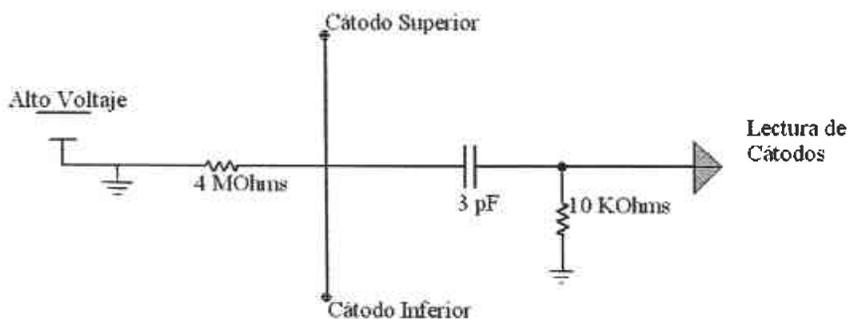


**Figura 5.30** Tapa inferior del detector donde se aprecia la estructura formada con perfiles de aluminio.

La base de la cámara multialámbrica, debido al peso de la misma (~ 50 kg) necesitaba una estructura que ayudara a estabilizar la presión ejercida sobre el acrílico para evitar que ésta se deformara. Para dicho fin, se construyó una “reja” utilizando perfiles tipo “U” de aluminio de 2 ” de base, los cuales se colocaron en las orillas de la base, y también cubriendo el área de la misma (ver Fig. 5.30), con piezas colocadas longitudinalmente cada 30 cm. Todas las piezas fueron barrenadas para utilizar tornillos de 3/16 ”, los cuales, una vez colocados, fueron sellados en su extremo superior con resina epóxica para evitar la pérdida de gas del detector.

La conexión de alto voltaje fue realizada en una esquina del cátodo, introduciendo un cable tipo RG174/0 (que soporta hasta 5000 V) desde la parte inferior a través de un pequeño orificio y soldando el extremo del mismo en la superficie de cobre aplicando un diminuto punto de soldadura lo más plano posible. Este punto fue cubierto con una pintura aislante que soporta más de 3000 V, para después adherir cinta *kapton* en dicha región.

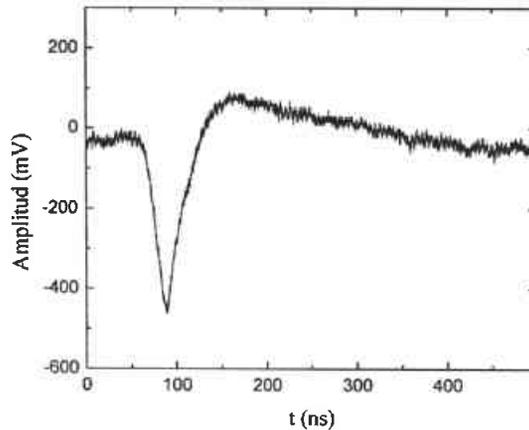
El cable antes mencionado, cuyo pequeño diámetro y flexibilidad permiten colocarlo en espacios reducidos y en cualquier geometría, después fue unido a un cable coaxial tipo RG59B que soporta hasta 3500 V, cuyas características físicas y mayor diámetro permiten un uso rudo del mismo. En la figura 5.31 se muestra esquemáticamente el circuito utilizado para la conexión de los cátodos al alto voltaje. La resistencia de 4 MΩ servía para limitar el paso de la corriente en caso de un corto circuito, tomando en cuenta que el voltaje de operación será de aproximadamente 2000 V, por lo que este elemento limitará la corriente a unos 0.5 mA.



**Figura 5.31** Diagrama del circuito electrónico asociado a los cátodos.

Los componentes de tipo resistivo y capacitivo tenían como objetivo filtrar y proteger la señal proveniente de los cátodos, lo cual permite de manera

alternativa trabajar en un detector multialámbrico, no sólo con las señales generadas por el ánodo, sino también con los pulsos producidos en las placas que proveen el alto voltaje. Los valores de la resistencia y el capacitor mencionados, obedecen a la relación que un arreglo de estas características debe cumplir para no perturbar la forma y magnitud del pulso [37]. La condición impone que el producto  $RC$  sea del orden del tiempo de subida o *rise time* de la señal estudiada [37].



**Figura 5.32** Señal generada por la detección de muones, obtenida con el prototipo B.

En nuestro caso, producto de la experimentación con los prototipos, teníamos registros del *rise time* de nuestras señales (ver Fig. 5.32), el cual era de  $\approx 25$  ns, de ahí que el producto  $RC = (10 \text{ k}\Omega)(3 \text{ pF}) = 30 \text{ ns}$ , cumpliera la exigencia previamente citada. El valor de  $R$  debía además ofrecer un buen acoplamiento entre las impedancias subsecuentes ( $50 \text{ }\Omega$ ), mientras que el capacitor de  $3 \text{ pF}$  a  $3 \text{ kV}$  protegía de una descarga a los elementos de lectura electrónica.

La construcción del cátodo superior se dio en similares condiciones. Al igual que su contraparte inferior, se retiró el cobre de las orillas hasta obtener un área de  $(99 \times 99) \text{ cm}^2$ . Se soldó de igual forma el cable que suministraría el alto voltaje en una esquina, se cubrieron con cinta *kapton* los bordes, y a diferencia del inferior, éste cátodo fue adherido a la tapa con pegamento especial para acrílico. Aunque esta pieza debía contar además con la entrada y salida destinadas para suministrar el gas al interior de la cámara. Para estas conexiones se barrenaron orificios donde posteriormente se pegaron con resina epóxica trozos de manguera de plástico y se unieron codos tipo NPT de

1/4 ”. En la figura 5.33 aparecen los ángulos de aluminio destinados a brindarle rigidez a la superficie completa del cátodo superior. Dichas piezas de 1 ½ ” de ancho servían además como soportes de la tapa superior, necesarios en el momento de levantar o alinear la mencionada estructura.



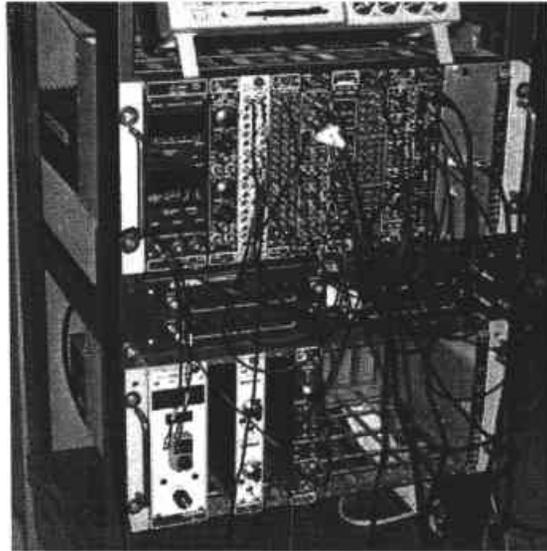
**Figura 5.33** Aspecto del detector multialámbrico terminado y cerrado, donde se aprecia la tapa y cátodo superior, junto con algunos de sus componentes.

La distancia requerida de 5 mm entre el cátodo superior y los alambres, se consiguió al construir un bastidor de acrílico que descansaba en todo el marco de aluminio con sus respectivos sellos de O-ring, para evitar fugas de gas. Las 4 piezas de este separador, dadas sus dimensiones, también fueron diseñadas de manera independiente, para una vez construidas, unir las con resina epóxica en las esquinas. Los planos de esta estructura aparecen en el Apéndice VI.

### 5.4 Instrumentación electrónica

La mayor parte de la electrónica de lectura utilizada fue de tipo NIM (*Nuclear Instrument Module*), establecida como estándar instrumental de tipo modular en 1964, la cual es utilizada ampliamente en experimentos de física nuclear y de altas energías. Cuenta con un *crate* o contenedor provisto de conectores especiales para el suministro de distintos valores de voltaje directo ( $\pm 6$  V,  $\pm 12$  V y  $\pm 24$  V) en donde se insertan los distintos módulos necesarios para la instrumentación asociada. En nuestro caso fue la mejor opción instrumental, dado que dicho estándar maneja generalmente en sus distintos módulos

señales negativas rápidas con *rise time* del orden de nanosegundos, las impedancias de entrada y salida al igual que los cables utilizados (tipo BNC o *lemo*) son de  $50 \Omega$ , además de contar con una estructura modular práctica y de uso rudo, apropiada para los ulteriores fines de detección en un sitio arqueológico.



**Figura 5.34** Vista frontal de la electrónica de lectura tipo NIM. Donde se aprecian los distintos módulos electrónicos insertados en sus respectivos contenedores o "crates".

Los mayoría de los módulos involucrados en la etapa de adquisición de datos contaban con sistemas de ajuste en los controles frontales, necesarios para acondicionar sus funciones de acuerdo a las características de las señales analizadas.

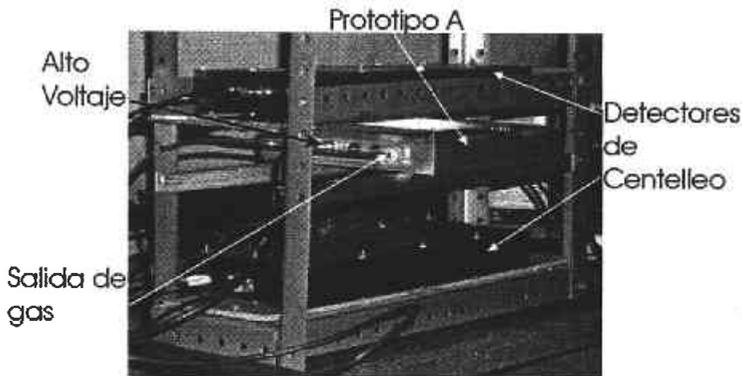
A continuación se expone la instrumentación asociada a cada etapa experimental de esta tesis.

### 5.4.1 Prototipo A

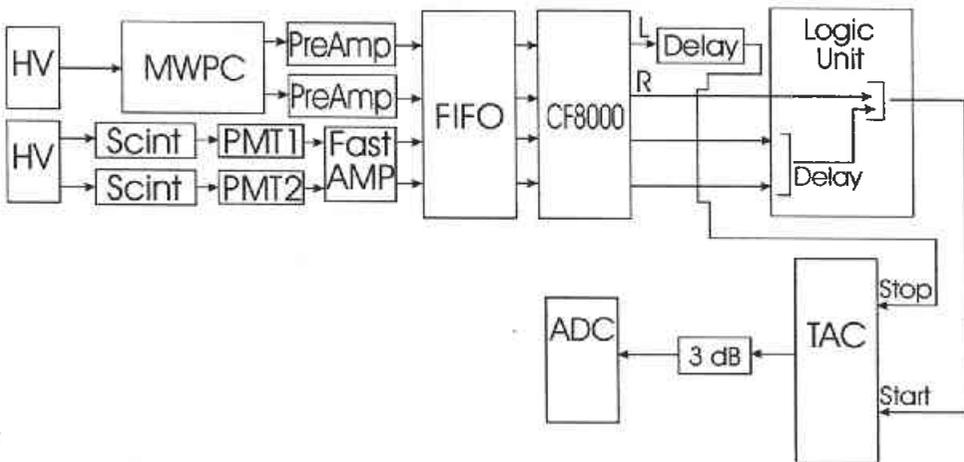
Las primeras pruebas realizadas para caracterizar el funcionamiento de las cámaras multilámbricas comenzaron con el estudio del prototipo *A*, cuyas principales características fueron explicadas en la sección 5.2.2.1. La cámara multilámbrica fue colocada en medio de un par de pequeños detectores de

centelleo (ver Fig. 5.35) con forma de trapecio, espesor de 1 cm y área de 57 cm<sup>2</sup>, cada uno con un fotomultiplicador *Hamamatsu R1450*, cuyas bases modelo E974-13 operaban a -1500 V.

El diagrama de la figura 5.36 muestra un esquema de los módulos, en su mayoría tipo NIM, que fueron utilizados para analizar las señales del prototipo *A* al detectar muones.



**Figura 5.35** Arreglo experimental para la detección de muones con el prototipo *A*.



**Figura 5.36** Diagrama de la electrónica modular asociada a la detección de muones con el detector prototipo *A* (MWPC) y los centelleadores (Scint).

La instrumentación electrónica modular (NIM) comenzaba, en el caso de los centelleadores, con la fuente de alto voltaje *Canberra 3002D* que suministraba

el potencial a los *PMT*'s, cuyas señales eran enviadas al amplificador rápido *Ortec* 420 con ganancia de 20, después estaba un módulo con la capacidad de multiplexar señales, *FIFO* 748 de *Phillips*, necesario para monitorear el comportamiento de los pulsos en todo momento durante el experimento como medida de seguridad. De ahí las señales eran llevadas a un discriminador de fracción constante *Ortec* CF8000, donde únicamente pasaban los pulsos que superaban en amplitud un nivel de discriminación establecido para después emitir un pulso lógico NIM (cuadrado  $\sim 1$  V, 1  $\mu$ s) aplicando el principio de discriminación por fracción constante, el cual se expone de manera detallada en el Apéndice VII.

Posteriormente, en la unidad lógica *LeCroy* 365AL, se fijaba la condición de coincidencia temporal al par de señales provenientes de los centelleadores, obteniendo de esta manera a la salida pulsos lógicos en caso de presentarse eventos coincidentes, producto de la detección de un muón. En esta etapa instrumental, la salida del módulo antes mencionado era puesta en coincidencia junto con la señal proveniente del lado derecho del prototipo *A* (señal *R* en la figura 5.36), teniendo así la señal de inicio o *start* para el convertidor de tiempo a amplitud *Ortec* TAC 567, donde la señal de *stop* correspondía a la señal izquierda de la cámara retrasada 2.75  $\mu$ s.

Cabe señalar que cada pulso del detector multialámbrico era preamplificado con un *Ortec* 142C. La principal tarea de estos dispositivos era la conversión en una señal de voltaje de la corriente colectada en los alambres que conforman al ánodo. Este modelo está optimizado para trabajar con niveles de ruido muy bajos, señales rápidas (*rise time*  $\sim 10$  ns), conectores tipo BNC terminados a 50  $\Omega$ , y para detectores con capacitancias entre 400 y 2000 pF.

En nuestro caso, se trata de un detector de placas paralelas con aire como dieléctrico, con lo que se obtiene un valor para la capacitancia de aproximadamente 800 pF. Cabe señalar que estos preamplificadores se polarizan con +24 V a 40 mA, -24 V a 10 mA y  $\pm 12$  V con 15 mA, que toma de la parte posterior de un módulo tipo NIM que cuente con dichas salidas de voltaje.

Siguiendo con la instrumentación, dichas señales eran multiplexadas en el módulo *FIFO*, y después discriminados con el módulo *CF800*. Posteriormente, la salida del TAC era llevada a través de un atenuador (3 dB) hacia el convertidor de señal analógica a digital *Ortec* ADCAM MCA 916-4k, que era una tarjeta ADC en un slot ISA de PC, donde a través de un analizador multicanal se obtenía el espectro asociado con la detección de muones.

## 5.4.2 Prototipo B

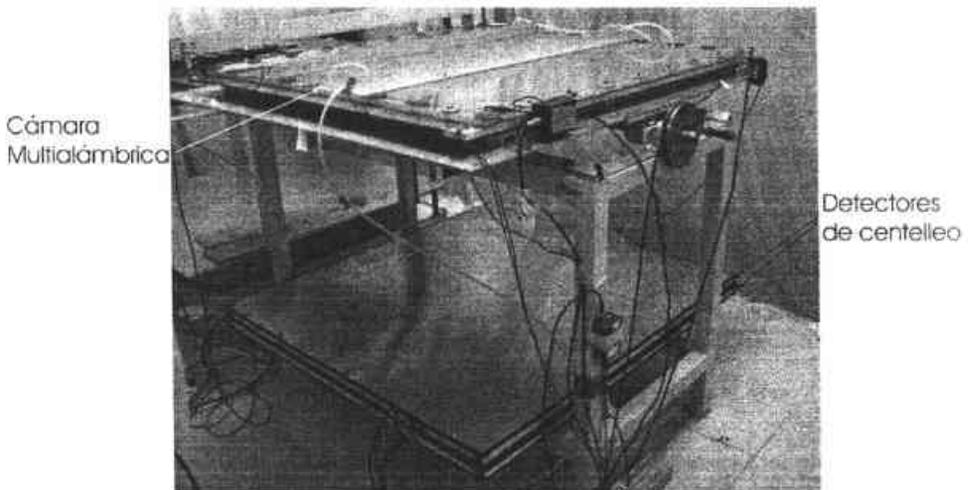
Los datos obtenidos por el primer prototipo, los cuales serán comentados en el capítulo 6, sirvieron para optimizar no sólo el diseño y construcción del prototipo *B*, sino que además sirvieron para experimentar la instrumentación cuyas técnicas de lectura serían utilizadas en la cámara multialámbrica de  $1 \text{ m}^2$ .

La electrónica modular asociada para este prototipo consistió básicamente en la instrumentación mostrada en la figura 5.36 con un cambio importante, debido al retraso total de la línea de retardo utilizada en cada caso. Para el prototipo *B* el retraso aplicado a la señal que serviría como *stop* en el TAC fue de 190 ns, esto con la finalidad de recorrer temporalmente el pulso terminal, tomando en cuenta que en esta ocasión el retardo total era aproximadamente de 36 ns (9 alambres activos). La forma como se colocó el prototipo *B* fue la misma que aparece en la figura 5.35, por lo que el área activa de la cámara estaba en medio de los centelleadores, cuya coincidencia generaba el *trigger* o disparo asociado a la detección de muones.

## 5.4.3 Instrumentación analógica

El arreglo de detectores de  $1 \text{ m}^2$  diseñado para estudiar la incidencia de radiación cósmica requería ser instrumentado con la electrónica de lectura que mejor resolución pudiera ofrecer, asegurando y garantizando la eficiencia del sistema para dicho fin.

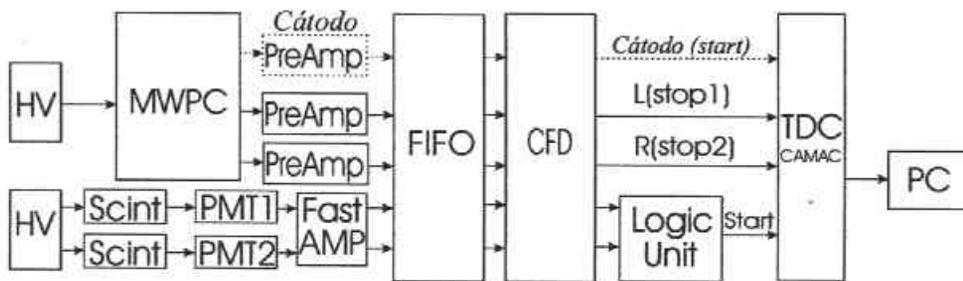
La instrumentación que aquí se expone corresponde al par de detectores de centelleo y a la cámara multialámbrica, ambos de  $1 \text{ m}^2$ , cuyo proceso de construcción y principales componentes se detallaron en las secciones 5.1 y 5.3. En la figura 5.37 se muestra la forma como fueron colocados los detectores involucrados en la detección de rayos cósmicos. La mesa diseñada para el proceso de tejido de los alambres fue utilizada como base para la cámara multialámbrica debido a las dimensiones y rigidez mecánica de la misma, en tanto que el par de detectores de centelleo fueron instalados uno sobre otro en la parte inferior de dicha estructura. Antes de sellar por completo la cámara multialámbrica fue necesario limpiar con aire limpio a presión sobre todos los elementos, piezas y componentes que la conforman, con el fin de evitar en la medida de lo posible la existencia de partículas de materiales ajenos a la misma.



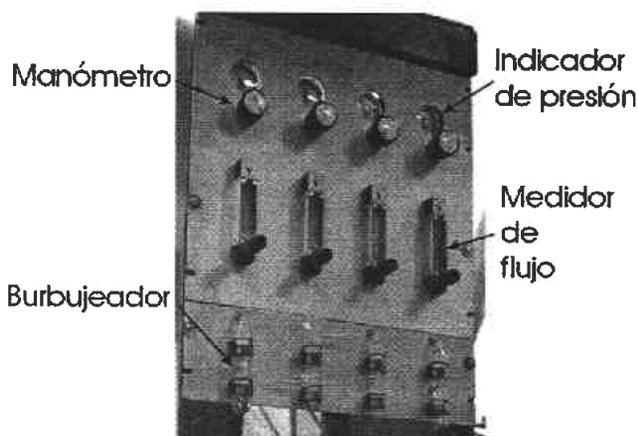
**Figura 5.37** Vista lateral del arreglo de detección para muones, formado por una cámara multialámbrica y un par de centelleadores.

Durante esta fase experimental se utilizaron dos preamplificadores sensibles a la carga *D2L* diseñados para este tipo de detectores [38], los cuales consumen +12 V, con una impedancia de  $50 \Omega$ , una ganancia de 20, *rise time* del orden de nanosegundos ( $\sim 10$  ns) y salida máxima de 1 V.

En la figura 5.38 aparece el diagrama de la electrónica modular empleada durante las mediciones. Primeramente, para la detección de partículas  $\beta$  se instrumentaron ambas salidas del ánodo y la señal proveniente de los cátodos (secciones punteadas en la figura 5.38). El potencial aplicado durante la fase experimental a la cámara fue de -1900 V, utilizando una fuente de alto voltaje *Canberra 3125*, valor en el cual el detector ofrecía una máxima eficiencia de conteo sin presentar descargas eléctricas entre el ánodo y los cátodos. Las señales izquierda y derecha del ánodo fueron respectivamente preamplificadas con un *V1.4* de *D2L*, mientras que las señales de los cátodos, terminadas en un solo cable, fueron conectadas a un preamplificador *Ortec 142C*. Los tres pulsos eran llevados después al *Octal linear fan-out (FIFO) 748 (Phillips)* con el fin de monitorear periódicamente el comportamiento de los mismos, así como la integridad del sistema en conjunto.



**Figura 5.38** Diagrama de la electrónica modular (NIM y CAMAC) asociada a la detección de muones y partículas  $\beta$  con la cámara multialámbrica (MWPC) y los centelleadores (Scint).



**Figura 5.39** Sistema de control y trampa de gas para la mezcla utilizada en el detector multialámbrico.

En la siguiente fase a través del módulo *Ortec CF800* (CFD) se discriminaban los eventos del ruido y se obtenían pulsos lógicos con información temporal, fijando umbrales mínimos de  $-100$  mV para los pulsos del ánodo, y de  $-50$  mV para la señal del cátodo.

De ahí, los pulsos lógicos ( $\sim -1$  V,  $1$   $\mu$ s) eran conectados al convertidor de tiempo a señal digital TDC 7186 (*Phillips*) de estándar CAMAC (*Computer Automated Measurement and Control*), donde el inicio (*start*) estaba dado por la señal del cátodo, en tanto que las señales izquierda y derecha del ánodo servían como eventos de terminación o *stop*. En este módulo se tenía ajustada una configuración de  $200$  ps por canal, si tomamos en cuenta que dicho dispositivo es de  $12$  bits, contábamos con un rango aproximado de conversión de  $820$  ns.

El estándar CAMAC es utilizado ampliamente en experimentos de Física Nuclear y Altas Energías. Su configuración modular está compuesta por un *crate* donde se insertan los distintos módulos a utilizar, de donde obtienen suministro eléctrico y en el cual transmiten la información obtenida, para después llevarla a una computadora conectada al mismo, procesando ahí la información adquirida. En nuestro caso, la comunicación entre la computadora (Athlon/2 GHz) y el CAMAC *Wiener*, así como todas las rutinas y algoritmos destinados a la adquisición de datos, procesamiento y despliegue gráfico fueron programados utilizando el lenguaje *LabVIEW* 6.1 [39]. Para una explicación sobre las principales características de este lenguaje de programación puede consultarse el Apéndice VIII.

Durante la etapa de mediciones se trabajó con un flujo de  $5 \text{ mm}^3/\text{s}$  y una presión de 0.2 bar utilizando una trampa de gas como burbujeador a la salida, a base de aceite para bombas de vacío, que evitaba la intromisión de aire o gases externos (Fig. 5.39), garantizando así una atmósfera interna compuesta únicamente por  $\text{CO}_2\text{Ar}$ .

En el diagrama de la figura 5.38 también se indica la manera en que estos detectores fueron instrumentados para el estudio de radiación cósmica. En cada fotomultiplicador (PMT1 y PMT2) se aplicaba un potencial de -1500 V, suministrado por una fuente de alto voltaje *Canberra* 3002D. Las señales emitidas por cada sistema fotomultiplicador eran llevadas a un amplificador rápido *Ortec* 420, con ganancia de 20 y *rise time* del orden de nanosegundos. Posteriormente ambos pulsos eran multiplexados en el módulo FIFO 748 (*Phillips*), donde éstos eran monitoreados continuamente. Para después introducirlos en el *Ortec* CF8000 (CFD), para el proceso de discriminación con un umbral de -70 mV y *delay* de 2 ns en ambos casos. La condición de coincidencia entre el par de señales se garantizaba con el módulo *Caen* Logic Unit N405, el cual emitía un pulso lógico ( $\sim -1 \text{ V}$ ), responsable del inicio o *start* en el TDC 7186 (*Phillips*), donde la configuración se mantenía en 200 ps por canal. Cabe recordar que las señales terminales o *stop* en dicho módulo eran las provenientes de ambos lados del detector multialámbrico, las cuales se restaban entre sí durante la adquisición de datos. La razón instrumental de dicha operación aritmética se menciona en la sección 6.1.2.

#### 5.4.4 Instrumentación digital

La etapa experimental central de esta tesis estaba enfocada a la digitalización y posterior análisis de pulsos asociados a la detección de radiación cósmica. Una vez caracterizado el sistema para detección de muones, contábamos con la posibilidad de extender nuestra investigación sobre la información temporal

adquirida, realizando para ello un análisis más detallado de cada uno de los pulsos generados tras la detección de radiación cósmica, con la finalidad de obtener la mejor resolución posible dada la configuración electrónica de la cámara multialámbrica.

En algunos casos, y de acuerdo con las necesidades experimentales imperantes, es común utilizar circuitos integrados compactos [41] diseñados para amplificar, filtrar, y discriminar la información adquirida. Bajo otras circunstancias, se opta por la instrumentación de interfases electrónicas programables (FPGA's) [42] capaces de analizar los pulsos entrantes, obteniéndose la información temporal necesaria para reconstruir, entre otros resultados, espectros de posición.

Sin embargo, para conseguir la optimización en resolución del detector en conjunto, no bastaba con mejorar los sistemas de filtraje, amplificación y discriminación. Nuestro objetivo, consistía en analizar a profundidad todas y cada una de las señales adquiridas, conociendo de esta forma las principales características temporales de los pulsos generados, contribuyendo así a un estudio exhaustivo de la información proveniente del detector sin ningún tipo de alteración producida por los módulos electrónicos que generalmente se utilizan para la detección de radiación cósmica con sistemas multialámbricos. Este análisis sin precedentes en lo que a detección de muones de alta energía se refiere, brindaría además la posibilidad de implementar una nueva forma de análisis.

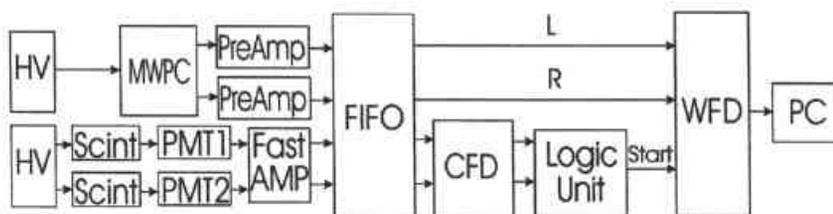
La reciente aparición en el mercado comercial de electrónica ultrarápida capaz de procesar y almacenar información con resolución del orden de picosegundos ha ayudado a intensificar el estudio de fenómenos pertenecientes a ramas del conocimiento tan diversas como Física de altas energías, Electro-óptica, Automatización industrial, Telecomunicaciones, Aplicaciones con láser, Aeronáutica espacial e Instrumentación remota. Dada la información analógica que necesitábamos analizar, era imperante el uso de un instrumento que adquiriera las señales a estudiar con la mejor resolución posible, logrando con ello un análisis confiable y detallado de los fenómenos involucrados.

Una opción instrumental con la que contábamos era la utilización de una tarjeta digitalizadora, la cual almacena con una cierta frecuencia información analógica para después transformarla y guardarla en señales digitales para su ulterior análisis. En nuestro caso, la instrumentación incluyó un digitalizador o WFD (*WaveForm Digitizer*) Gage modelo Compuscope 85G de 8 bits, con capacidad de muestreo de 5 GS/s, el cual era conectado a través de un slot PCI a una computadora con procesador de 2 GHz. Las rutinas

de configuración, adquisición, monitoreo gráfico y control fueron desarrolladas con el lenguaje Labview 6.1.

El digitalizador contaba con tres conectores tipo BNC a  $50 \Omega$  en la parte posterior, uno de los cuales aceptaba señales de inicio con un nivel de *trigger* variable, mientras que los canales restantes recibían las señales analógicas a digitalizar con un máximo de  $\pm 5$  V.

En la figura 5.40 se muestra la instrumentación utilizada para la detección de muones, adquiriendo las señales correspondientes con el WFD.



**Figura 5.40** Diagrama de la electrónica modular asociada a la digitalización de señales generadas por la detección de muones.

La señal de inicio o *trigger* en el WFD era la originada por la coincidencia requerida en ambos centelleadores, cuya instrumentación se ha explicado con anterioridad. En el caso de los pulsos (L y R) provenientes de la cámara multialámbrica, después de ser preamplificados y posteriormente multiplexados en el FIFO, éstos fueron llevados directamente al WFD para su adquisición. La condición de inicio en el digitalizador estaba configurada para recibir ambas señales (L y R) sólo si existía un pulso de disparo (*trigger*) proveniente de la coincidencia entre centelleadores.

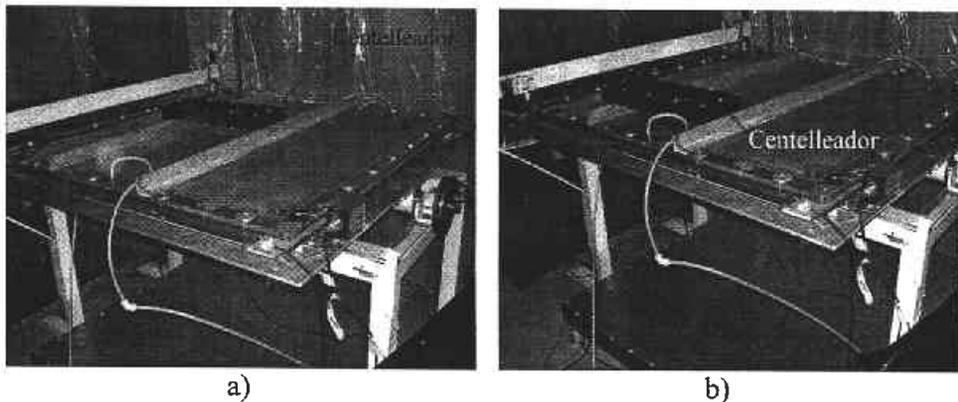
El WFD producía 4992 medidas consecutivas de amplitud, de 8 bits cada una, con un muestreo de 200 ps/canal, teniendo así un intervalo de digitalización de 998.4 ns por señal. Los pulsos adquiridos tras la detección de radiación cósmica eran almacenados en la computadora mencionada, guardándolos en modo ASCII como parejas de señales con características de amplitud y tiempo, con una numeración consecutiva, facilitando la identificación para su ulterior análisis.

#### 5.4.4.1 Experimento de triple coincidencia

Recordemos que uno de los principales objetivos tomados en cuenta para el diseño, construcción e instrumentación del sistema de detección propuesto, era

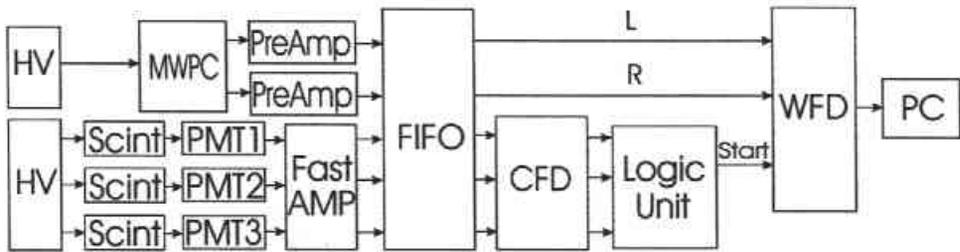
su operación como detector sensible a la posición. Las pruebas realizadas ante radiación cósmica y partículas  $\beta$  pusieron de manifiesto la sensibilidad espacial unidimensional de la cámara multialámbrica.

Sin embargo, como parte de la adecuada caracterización de un sistema de tales dimensiones, era necesario corroborar la variación registrada, en caso de existir, al detectar radiación ionizante a lo largo de un mismo alambre. Es decir, de manera perpendicular a la dirección en que fueron implementadas las unidades de retardo. Para registrar experimentalmente el comportamiento asociado bajo estas condiciones se pensó en un experimento de triple coincidencia que incluyera un pequeño detector de centelleo que sirviera como monitor de los muones detectados. En la figura 5.41 se muestra la forma como se llevó a cabo dicho experimento.



**Figura 5.41** a) Colocación en la parte central del centelleador "monitor" para realizar el experimento de triple coincidencia. b) Medición en un extremo de la cámara multialámbrica.

La idea principal de este experimento consiste en añadir una condición extra, además de la doble coincidencia ya implementada, exigiendo ahora la detección de muones sólo en el área comprendida por el pequeño detector de centelleo colocado sobre la cámara multialámbrica con el fin de desplazarlo a lo largo de la dirección de los alambres, realizando así mediciones en la parte central y en un extremo del detector multialámbrico, bajo las mismas condiciones, digitalizando las señales generadas por el paso de radiación cósmica. La instrumentación asociada a dichas mediciones se ilustra en la figura 5.42.



**Figura 5.42** Diagrama de la electrónica modular asociada a la digitalización de señales en el experimento de triple coincidencia.

El nuevo elemento en la instrumentación asociada a la detección de muones estaba asociado a la utilización de un tercer detector de centelleo con forma de trapecio, espesor de 1 cm y área de  $57 \text{ cm}^2$ , con un fotomultiplicador *Hamamatsu* R1450, y base modelo E974-13, que operaba a  $-1500 \text{ V}$ . Este fue uno de los centelleadores utilizados con las cámaras multialámbricas prototipo. Cabe mencionar que la electrónica modular correspondiente al resto de los detectores guardaba la misma configuración que la expuesta en la sección anterior.

La principal función de este detector de centelleo era la de contribuir con registros de triple coincidencia, donde estarían involucrados los 2 centelleadores de  $1 \text{ m}^2$  y este último. En dicho fotomultiplicador (PMT3) se aplicaba un potencial de  $-1500 \text{ V}$ , suministrado por una fuente de alto voltaje *Canberra* 3002D.

Las señales emitidas fueron llevadas a un amplificador rápido *Ortec* 420, con ganancia de 20 y *rise time* del orden de nanosegundos. Posteriormente este pulso era multiplexado en el módulo FIFO 748 (*Phillips*), donde era monitoreado continuamente. Para después introducirlo en un canal del *Ortec* CF8000 (CFD), para el proceso de discriminación con un umbral de  $-50 \text{ mV}$  y *delay* de 2 ns. La condición de triple coincidencia entre el par de centelleadores grandes y el detector pequeño se garantizaba con el módulo *Caen* Logic Unit N405, el cual emitía un pulso lógico ( $\sim -1 \text{ V}$ ) en caso de presentarse la detección de un evento en los 3 centelleadores generado por el paso de un muón. Dicha señal era la responsable del inicio o *start* en el WFD, para así digitalizar y almacenar el par de pulsos provenientes de cada extremo de la cámara multialámbrica.

La primera posición escogida para digitalizar los eventos registrados en triple coincidencia fue en medio de la cámara, es decir, a  $55 \text{ cm}$  de un extremo. El detector fue apoyado durante las mediciones en los perfiles de aluminio de la tapa, mismos que sirvieron como soporte durante la segunda

fase experimental, en la que el detector se recorrió a lo largo de la dirección de dichos perfiles situándolo a 7 cm del extremo del detector (ver figura 5.41). En cada una de las dos posiciones citadas se adquirieron alrededor de 30,000 eventos para su ulterior análisis. Los resultados de los estudios realizados a estos conjuntos de datos aparecen en el capítulo 6.



## Capítulo 6

### Procedimientos y Resultados

#### 6.1 Adquisición analógica de datos

Uno de los objetivos al construir el sistema de detección para rayos cósmicos, era su ulterior utilización en la búsqueda de posibles cámaras (espacios vacíos) en el cuerpo de la Pirámide del Sol, a través del flujo detectado de muones atmosféricos. Como todo sistema nuevo, cuyas dimensiones lo convertían en un detector único en su género, diseñado en base a una serie de consideraciones teóricas, técnicas y empíricas, era necesario poner a prueba el funcionamiento del detector en conjunto y verificar el desempeño instrumental propuesto, logrando con ello una caracterización que mostrara el margen de operación alcanzado.

Dadas las características de la radiación a estudiar, no era necesario realizar calibraciones, mediciones o pruebas de operación en el sitio arqueológico de interés. Como se ha mencionado, los muones que mayor conteo registrarán, serán los de bajas energías. De estos, los que más contribuirán a nuestros propósitos, serán los que lleguen al detector con energías mayores a 2 GeV. Dicha consideración se debe a que los muones con energías menores a la citada, serán desviados de la trayectoria original con que incidieron en la pirámide por un fenómeno conocido como dispersión múltiple.

A continuación se muestran los resultados más importantes obtenidos con los prototipos construidos, cuyos registros sirvieron para adoptar criterios que optimizaran el rendimiento, eficiencia y operación del sistema de detección multialámbrico. Posteriormente en este capítulo, se detallan los datos adquiridos con la cámara multialámbrica y los detectores de centelleo, ambos de 1 m<sup>2</sup>, así como la caracterización de la cámara multialámbrica para la detección de rayos cósmicos utilizando la digitalización y posterior análisis de eventos adquiridos.

##### 6.1.1 Resultados de prototipos

El primer paso en la búsqueda de un diseño óptimo de cámara multialámbrica capaz de operar y detectar radiación cósmica utilizando una serie de materiales e implementando un sistema de lectura electrónico planeado para

integrarse en el detector de  $1 \text{ m}^2$ , se dio con la construcción del prototipo *A* detallado en la sección 5.2.2.1.

### 6.1.1.1 Prototipo A

Estos detectores requieren de un periodo inicial de purga, el cual consiste básicamente en mantener un flujo constante de gas ( $\text{CO}_2\text{Ar}$ ) a presión atmosférica durante un par de horas después de haber cerrado y sellado el detector, con la finalidad de generar una atmósfera interna libre de polvo, aire e impurezas. Para un detector de este volumen, teníamos un flujo de  $8 \text{ mm}^3/\text{s}$  con una presión de 0.4 bar al inicio, ya que durante la adquisición de datos trabajamos con un flujo de  $5 \text{ mm}^3/\text{s}$  y una presión de 0.2 bar. Debido a la toxicidad de la mezcla utilizada para estos detectores, generalmente la salida de gas se envía fuera del laboratorio a través de una manguera hacia el aire libre.

Posteriormente se incrementó lentamente el voltaje ( $0 \rightarrow -1000 \text{ V}$ ) aplicado al par de cátodos, y suministrado por una fuente *Canberra 3125*. Este modelo fue escogido debido a la corriente máxima que proporciona ( $300 \mu\text{A}$ ) y por contar con un sistema automático de protección en caso de corto circuito.

Las primeras pruebas de detección fueron realizadas irradiando con partículas  $\beta$  (electrones) de una fuente radiactiva de  $^{90}\text{Sr}$  sobre el área activa. Durante el proceso de caracterización inicial fueron monitoreadas continuamente las señales registradas en el osciloscopio, previamente amplificadas por dos preamplificadores sensibles a la carga *Ortec 142C*.

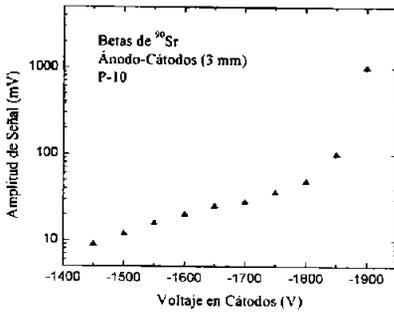
Con el objetivo de caracterizar la respuesta de este sistema de detección multialámbrico en búsqueda de una configuración óptima, se obtuvo la curva de respuesta experimentando con distintas variables.

Las mezclas de gas disponibles comercialmente, y cuya composición era apropiada para la operación del detector, de acuerdo con la bibliografía asociada [5, 6, 33, 35], eran la de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  y la mezcla de Metano-Argón conocida como P-10. Primeramente obtuvimos las curvas de respuesta para P-10 variando la distancia ánodo-cátodos de 3 a 6 mm (Fig. 6.1).

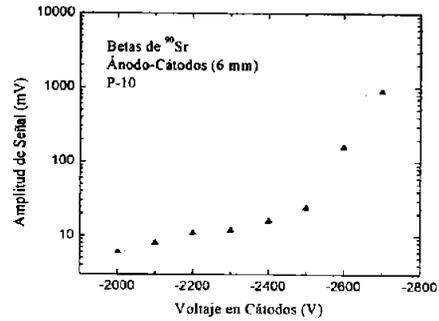
Posteriormente realizamos la misma medición utilizando el gas de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  (Fig. 6.2). Cabe señalar que las distancias ánodo-cátodos probadas, obedecían a las separaciones promedio reportadas en la literatura correspondiente [5, 31, 33, 34] cuando se trabaja con distancias entre alambres cercanas a 2.54 mm, como fue nuestro caso. La información así obtenida

serviría principalmente para conocer la región donde el sistema comenzara a perder estabilidad eléctrica, presentando chispas o descargas.

A partir de las figuras 6.1 y 6.2 puede observarse el comportamiento obtenido al utilizar las dos mezclas citadas. Es de notar que con P-10 el detector comenzaba a producir señales con 100 V menos que en el caso del  $\text{CO}_2\text{Ar}$ , lo que por ende ocasionaba la saturación del detector para menores voltajes con el primer gas, al mismo tiempo que la magnitud de los pulsos era aproximadamente 15% mayor en la región lineal.

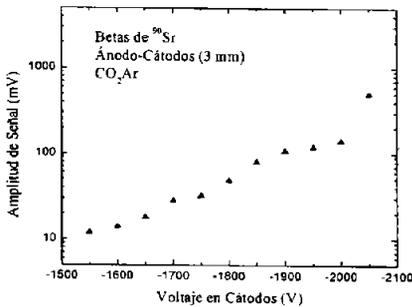


a)

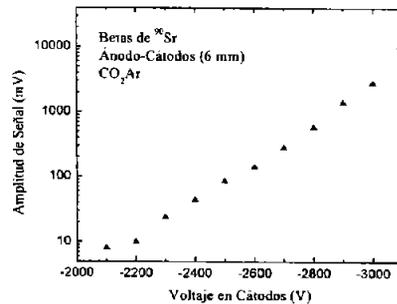


b)

**Figura 6.1** a) Curva de respuesta utilizando la mezcla P-10 y separación ánodo-cátodos de 3 mm. b) Curva de respuesta variando la distancia mencionada a 6 mm con el mismo gas.



a)

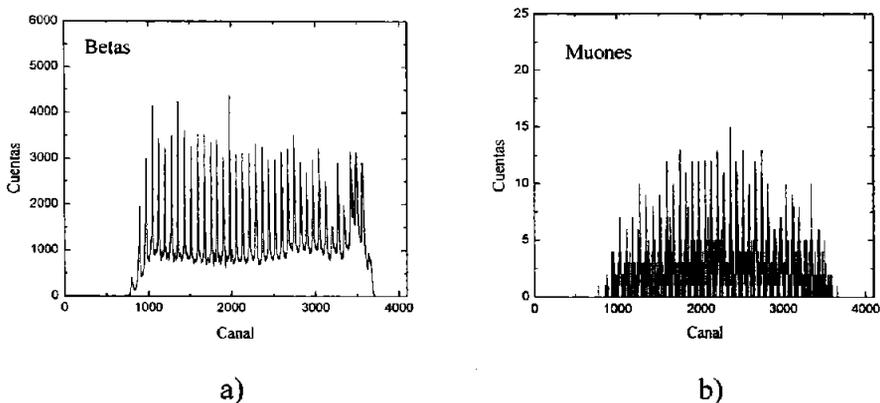


b)

**Figura 6.2** a) Curva de respuesta utilizando gas de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  y separación ánodo-cátodos de 3 mm. b) Curva de respuesta variando la distancia mencionada a 6 mm con la misma mezcla.

Una desventaja encontrada al operar con P-10 eran las continuas descargas eléctricas y chispas producidas de los alambres hacia los cátodos, dada su alta eficiencia para la creación de avalanchas de electrones hacia los alambres. Otro punto en contra de la ulterior utilización del P-10 era su naturaleza flamable dada su composición a base de Metano-Argón (10%, 90%), característica de alto riesgo no apropiada para el sitio donde estaba planeada su futura operación. En cuanto a las separaciones ánodo-cátodos estudiadas, la configuración de 3 mm necesitaba de un menor voltaje, con ambos gases, debido al comportamiento del campo eléctrico cuando se varía la distancia, pero presentaba la aparición de mayor cantidad de descargas.

Para una distancia de 6 mm era necesario suministrar un mayor voltaje a los cátodos, pero esta configuración presentaba una mayor estabilidad eléctrica, ya que para 3 mm tuvimos severos problemas al reventarse los alambres por las descargas y arcos eléctricos creados en la superficie de los cátodos. De esta manera la configuración de 6 mm ofrecía un sistema de detección más confiable y estable, aún cuando se requiriera aplicar un voltaje mayor a los cátodos.



**Figura 6.3** Espectros de posición obtenidos con el prototipo de cámara multialámbrica. a) Irradiando con partículas  $\beta$  y b) Muones.

Al haber elegido la mezcla de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  y la distancia de 6 mm, conocíamos el voltaje de operación dentro del cual nuestro detector se comportaba de manera proporcional (Fig. 6.2 b). En la figura 5.3 aparecen los espectros de posición obtenidos a través del analizador multicanal antes mencionado. La figura 6.3 a) corresponde al espectro producido tras irradiar con partículas  $\beta$ , colocando para ello una fuente radiactiva de  $^{90}\text{Sr}$  sobre la ventana activa del detector a

una distancia de 30 cm por un periodo de 1 hora. Mientras que el espectro asociado a muones, que fue obtenido aplicando la condición de coincidencia entre los centelleadores y suministrando un potencial de -3000 V a la cámara, se produjo en un lapso de 14 horas. Cabe recordar que la instrumentación electrónica asociada a este experimento fue explicada en la sección 5.4.1.

En las figuras 6.3 a) y b), aparecen las contribuciones de cada uno de los alambres sobre los canales de adquisición del analizador multicanal, por lo que los picos observados son contribuciones, con estructura tipo gaussiana, debidos a la adquisición de datos. Dichas estructuras o picos fueron analizados durante esta tesis tomando en cuenta la semi-anchura o *FWHM* (*Full Width at Half Maximum*). Este valor es una medida que representa el ancho de una distribución en función de  $\sigma$  (donde  $FWHM = 2.35\sigma$ ).

Así mismo, la representación de los datos en el eje de las abscisas fue transformada en distancia de una manera lineal considerando la separación entre el primer y último alambre. Dicha transformación se aplicó también en el caso del tiempo tomando en cuenta el retardo total del detector, utilizando las señales izquierda y derecha como inicio y término, respectivamente.

Al analizar los espectros pudimos comprobar que el ruido era  $\sim 5$  veces menor que las señales estudiadas, mientras que la resolución temporal, asociada a la semi-anchura de los picos observados, mantenía una uniformidad a lo largo del detector de  $\pm 3$  ns, la cual era una buena resolución, si tomamos en cuenta que representaba menos del 10% de los retardos utilizados entre cada pareja de alambres (50 ns). En tanto que la resolución asociada en posición era de  $\pm 0.2$  mm.

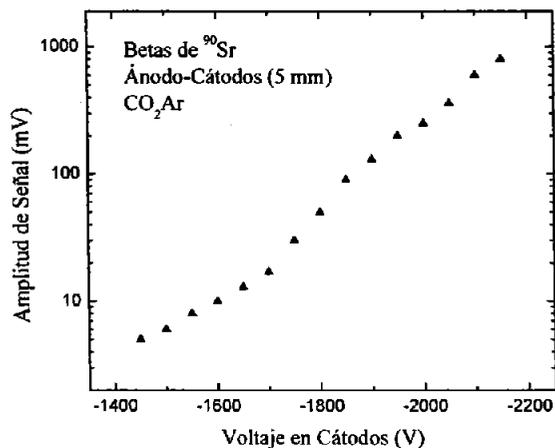
Es de notar, que la detección de muones presenta un espectro con mejor resolución en posición respecto al obtenido con partículas  $\beta$ , debido a que éstas últimas experimentan múltiples trayectorias o “rebotes” al incidir en el detector, en tanto que los muones arriban con trayectorias rectilíneas.

Una vez probados los materiales y el sistema de lectura en el prototipo A fue necesaria la implementación del siguiente prototipo con la finalidad de optimizar la instrumentación necesaria para el detector de  $1 \text{ m}^2$ .

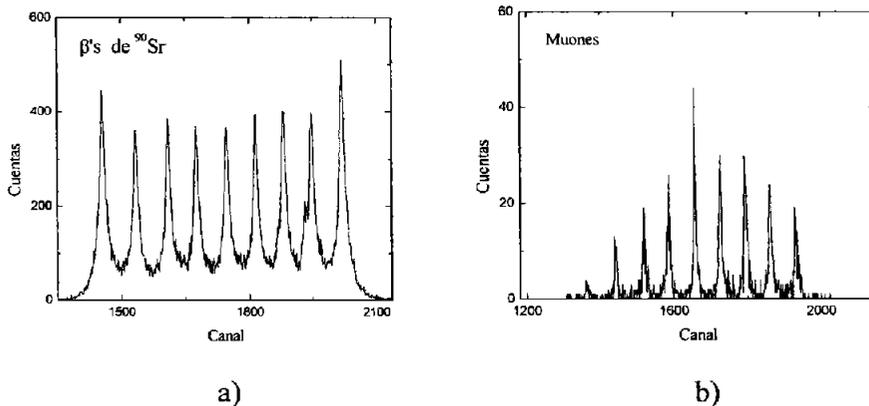
### 6.1.1.2 Prototipo B

El segundo diseño de cámara multialámbrica, cuyo proceso de construcción se expuso en la sección 5.2.2.2, y su instrumentación se detalló en la sección 5.4.2, contaba con todas las especificaciones destinadas a implementarse en el detector final. En este caso, también era necesario obtener la curva de

respuesta para conocer el intervalo de operación óptimo con el cual detectaríamos radiación cósmica o partículas  $\beta$  (Fig. 6.4).



**Figura 6.4** Curva de respuesta obtenida con la irradiación de partículas  $\beta$ , y utilizando la mezcla  $\text{CO}_2\text{Ar}$ .



**Figura 6.5** Espectros de posición para el prototipo B. a) Irradiando con partículas  $\beta$ . b) Obtenido con radiación cósmica.

Los espectros mostrados en la figura 6.5 se produjeron al aplicar un potencial de  $-2100\text{ V}$ , debido a que en esa zona por arriba de la respuesta lineal, el detector mostraba la mayor eficiencia de conteo sin tener problemas de

descargas o chispas de los cátodos hacia los alambres. El espectro asociado a muones se obtuvo en un intervalo de 12 horas. El ruido presente en dichas mediciones era  $\sim 10$  veces menor que las señales analizadas, mientras que la resolución temporal, que resultó ser uniforme a lo largo del detector, tuvo un valor de  $\pm 0.26$  ns. En tanto que la resolución asociada para la posición era de  $\pm 0.32$  mm.

### 6.1.2 Mediciones con el sistema de detección para muones

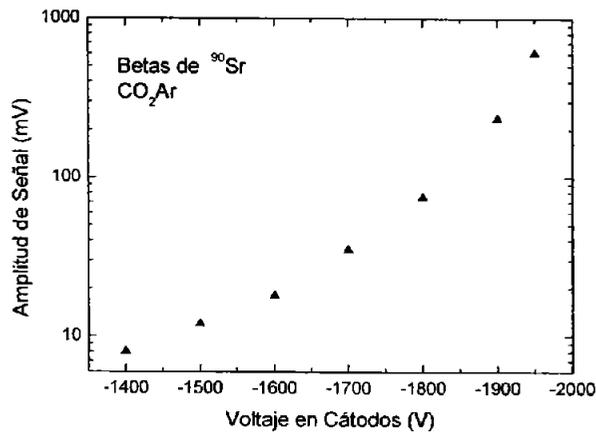
Al haber experimentado con los prototipos *A* y *B* los materiales y sistemas de lectura electrónica planeados a implementar en el sistema de detección para rayos cósmicos, llegué a conocer las principales características mecánicas, eléctricas y electrónicas que el arreglo final debía cumplir para un buen funcionamiento, aunado a un desempeño confiable que permitiera detectar muones con la mejor respuesta y resolución posible, tomando en cuenta los materiales empleados y los componentes electrónicos escogidos para su instrumentación.

Es en la etapa de acondicionamiento inicial donde por lo regular pueden encontrarse y solucionarse problemas de acoplamiento eléctrico, niveles de tierra, ruido externo o descargas ocasionadas por piezas mal sujetadas, alambres soldados incorrectamente e inclusive pequeños segmentos de polvo (pelusas) adheridos a lo largo del ánodo de la cámara multialámbrica. Una práctica común al trabajar con detectores de tales dimensiones consiste en “aterrizar” la estructura completa utilizando varios cables caimán-caimán conectándolos desde los tornillos y perfiles de aluminio hacia las bases metálicas de los módulos electrónicos utilizados, garantizando así un mismo nivel de tierra, lo cual se traduce en señales más limpias y con una menor propensión a recibir ruido externo.

Una vez cerrado el detector multialámbrico, procedí a purgarlo con un flujo constante de  $\text{CO}_2\text{Ar}$  a presión atmosférica por un periodo de 4 horas antes de aplicar alto voltaje a los cátodos. Esto con la finalidad de generar una atmósfera interna libre de polvo e impurezas que pudieran generar descargas o arqueamiento eléctrico en cualquiera de los elementos internos al momento de suministrar el potencial eléctrico. Una vez transcurrido dicho intervalo temporal comencé a incrementar el alto voltaje a una razón promedio de  $-100$  V cada 5 minutos. De esta manera es fácil monitorear el comportamiento de las señales preamplificadas en el osciloscopio en caso de presentarse un problema de corto circuito o descargas en el interior del detector, las cuales la mayoría de las ocasiones no pueden verse ni mucho menos escucharse.

Dadas las dimensiones de este detector, para obtener la curva de respuesta ante partículas  $\beta$  (Fig. 6.6) fue necesario colocar la fuente radiactiva sobre el área central activa 2 m por encima de la misma, con el objetivo de irradiar de manera uniforme la mayor región posible, evitando así saturar una zona en particular del detector.

Conocido el intervalo dentro del cual operaba de manera lineal nuestro detector, y donde pude comprobar que por encima de -2000 V la cámara emitía descargas, volviéndose inestable en el sentido eléctrico, el siguiente paso era caracterizar el funcionamiento de la misma obteniendo un espectro de posición para partículas  $\beta$  y muones.

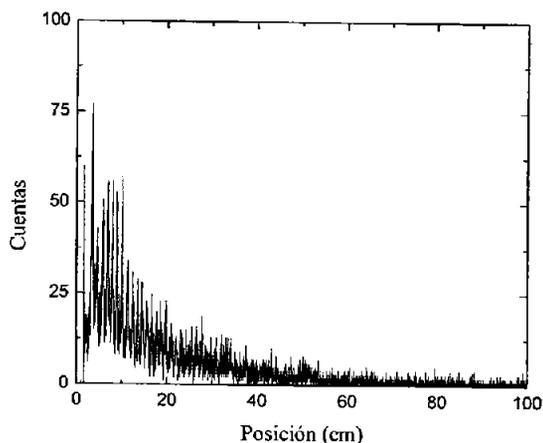


**Figura 6.6** Curva de respuesta asociada al detector multialámbrico.

Al inicio de las mediciones con partículas  $\beta$  no fue posible obtener espectros de posición donde pudiera apreciarse claramente la estructura de alambres asociada al detector (Fig. 6.7). Bajo estas condiciones el espectro mostraba una incipiente estructura en la zona inicial, que gradualmente iba perdiéndose hasta volverse indistinguible. Una de las principales razones ligadas a este comportamiento estaba relacionada con el *delay* o retraso temporal ( $\delta t$ ) del módulo (CFD) encargado de realizar la discriminación por fracción constante en las señales del ánodo, que en este caso era el modelo *Ortec* CF800, cuyo *delay* de fábrica es de 2 ns, el cual puede modificarse sólo hasta 10 ns con los *jumpers* internos.

Al estudiar detalladamente el comportamiento de la información a lo largo del detector, pude cuantificar que el tiempo de formación o *rise time* ( $t_s$ ) de los pulsos sufría un aumento progresivo a lo largo de la cadena de retardo.

De esta forma, los pulsos mostraban un intervalo de tiempos de formación que iba desde 10 ns al inicio, hasta 50 ns para las señales que habían recorrido toda la cadena de *delay lines*. Tomando en cuenta los principios de discriminación por fracción constante (ver Apéndice VII) y aplicando la ecuación A.1 con un *rise time* ( $t_s$ ) promedio de 30 ns y la fracción constante asociada a este módulo de  $f = 0.4$ , obtenemos un *delay*  $\sim 18$  ns, valor muy superior al retraso de fábrica implementado en el CF800, motivo por el cual sólo las señales con *rise time* del orden de 10 ns, eran correctamente discriminadas para su análisis temporal, como se observa en la parte izquierda de la figura 6.7.



**Figura 6.7** Espectro de posición para partículas  $\beta$  con un *delay* en el CFD de 2 ns.

Una vez estudiado el comportamiento temporal de los pulsos emitidos por el detector y al no contar en ese momento con un CFD con mayor retraso variable, procedí a cambiar el *delay* en dos canales del CF8000, soldando para ello *delay lines* de 24 ns en lugar de los *chips* de retardo incluidos en este módulo.

Cabe mencionar que después de estudiar las señales provenientes del ánodo se contempló la posibilidad instrumental de restarlas entre ellas al momento de adquirirlas en el TDC, mediante un algoritmo aplicado en línea. El análisis de los espectros obtenidos mostró que dicha operación aritmética es necesaria cuando se instrumenta un detector de estas dimensiones mediante el método de retraso temporal debido a la longitud de los alambres en el ánodo. Recordemos que al incidir una partícula ionizante en algún lugar a lo largo de

un alambre, la señal provocada por la avalancha de electrones generada en el medio es enviada hacia las líneas de retraso, y de ahí al resto de la electrónica.

La diferencia temporal entre dos eventos generados en los extremos del mismo alambre de 1 metro de longitud es de  $\sim 3$  ns, considerando una velocidad de transmisión cercana a la de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s). Teniendo así una propagación de error temporal del orden del retraso implementado entre cada uno de los alambres (4 ns). Para evitar dicha propagación cada pareja de señales del ánodo eran restadas en modo evento, es decir, tomando los datos generados a un mismo tiempo, eliminando así de forma simétrica la propagación de error temporal intrínseca de cada evento.

Para entender analíticamente este fenómeno, consideremos a  $t_{sc}$  como el tiempo de referencia generado por la doble coincidencia generada en ambos centelleadores por el paso de un muón, y al par de señales  $t_r$  y  $t_l$  como los tiempos de retardo de las señales derecha e izquierda de la cámara multialámbrica respecto a  $t_{sc}$ . Si ahora,  $t_{wc}$  es el tiempo en el cual es generado un pulso debido al paso de un muón en algún punto  $p$  a lo largo de un alambre del detector multialámbrico, y  $t_p$  es el tiempo de tránsito de dicho pulso entre el punto  $p$  y el correspondiente elemento de retardo, entonces el par de señales generadas por el paso de un muón, arriban a los extremos de la cámara multialámbrica en los tiempos:

$$t_i = (t_{sc} + t_p - t_{wc}) + n_i \Delta t \quad \dots (6.1)$$

donde  $i=r,l$ , y  $n_i$  es el número de unidades de retardo en cada lado, con  $\Delta t \approx 4$  ns, el valor nominal de cada unidad de retraso. Bajo estas condiciones, si no existiera ninguna diferencia temporal entre el evento detectado en la cámara multialámbrica y el par de centelleadores, tendríamos que,

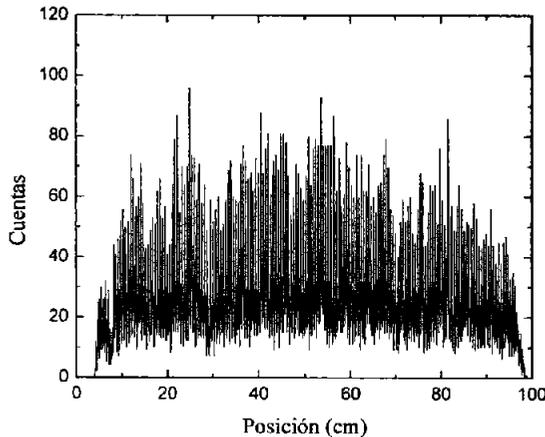
$$t_{sc} - t_{wc} = 0 \quad \dots (6.2)$$

para el caso ideal, lo cual no ocurre en nuestro arreglo experimental debido, entre otros factores, al fluctuante comportamiento de los tiempos de tránsito de las señales generadas en los centelleadores ( $t_{sc}$ ). Por lo que al restar la pareja de señales provenientes de ambos lados del detector multialámbrico, conseguimos eliminar las contribuciones espurias de carácter temporal asociadas para cada evento, teniendo así:

$$t_r - t_l = n \Delta t \quad \dots (6.3)$$

donde  $n = (n_r - n_l)$  es un número entero, relacionado a la identificación individual de cada uno de los alambres.

En la figura 6.8 se muestra un espectro de posición al irradiar por un periodo de 15 minutos el detector con una fuente radiactiva de  $^{90}\text{Sr}$  situándola a una distancia de 2 metros sobre el centro del área activa. Para dicho registro se utilizó el *delay* de 24 ns en el CF8000 antes mencionado para cada una de las señales del ánodo, las cuales fueron restadas entre sí al momento de la adquisición. En dicho espectro se aprecia la estructura de alambres del detector producida por la lectura a través de la cadena de líneas de retardo.



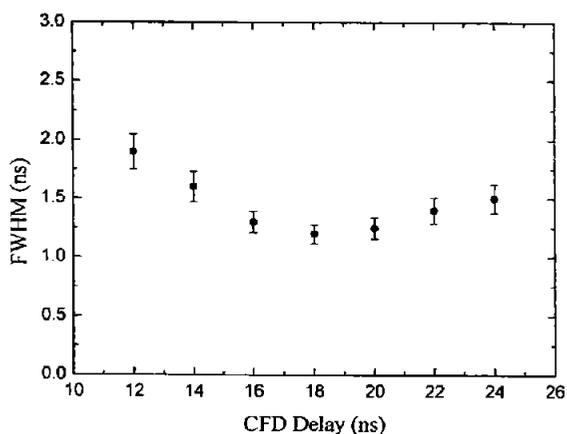
**Figura 6.8** Espectro de posición para partículas  $\beta$  con un *delay* en el CFD de 24 ns.

Cabe señalar que la transformación dimensional de canales a distancia, presente en los espectros de esta tesis, fue realizada al considerar la separación entre el primer y último alambre activos del detector ( $\sim 95$  cm), y asociando linealmente el retardo total registrado en el TDC.

Durante la etapa experimental antes descrita, el grupo de investigación donde participé adquirió un módulo de discriminación por fracción constante CFD 715 (*Phillips*), entre cuyas características sobresalía la posibilidad de fijar un *delay* arbitrario a través de la conexión en el panel frontal de un cable *lemo* conectado al mismo, con la longitud proporcional al retardo requerido ( $\sim 5$  ns/m). De esta forma, contábamos con la oportunidad de variar el *delay* aplicado a la señales del ánodo, con el fin de optimizar la resolución en posición, minimizando así la semi-anchura de cada pico que integra los espectros de posición y que representan la contribución de cada alambre del detector multialámbrico. Cabe recordar que dentro de este análisis se ajustaba

una curva de tipo gaussiana al pico asociado a un alambre, midiendo así la semi-anchura a la mitad de la altura de la curva mencionada (FWHM).

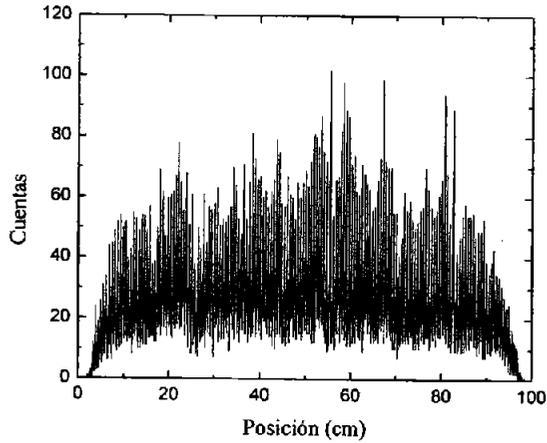
En la figura 6.9 se observa la semi-anchura (FWHM) medida al pico central de cada espectro de posición obtenido al variar el retraso a través de una unidad de retardo *Ortec* DB463, alrededor de los 20 ns, valor predicho por la ecuación A.1 con  $f = 0.33$  y  $t_s = 30$  ns (ver Apéndice VII). Cada valor en dicha gráfica se obtuvo al calcular el promedio de las 5 semi-anchuras más cercanas al pico central. El valor de retardo en el CFD para el cual se obtuvo la mejor resolución (menor FWHM) correspondió a  $\delta t = 18$  ns. El espectro de posición en el cual se aplicó dicho retardo aparece en la figura 6.10.



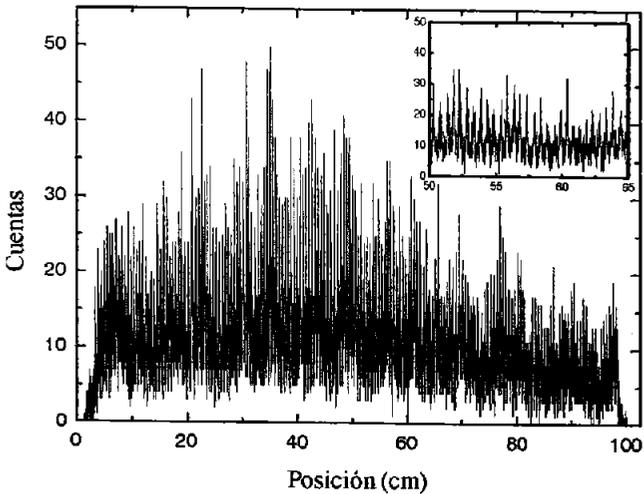
**Figura 6.9** Resolución (FWHM) asociada a los espectros de posición obtenidos al incrementar el retardo aplicado al módulo de discriminación (CFD).

Una vez caracterizado el parámetro temporal que permitía obtener la mejor resolución dadas las condiciones instrumentales mencionadas, procedí a realizar la detección de muones con el sistema propuesto. Para ello, hacía falta incorporar al par de centelleadores de  $1 \text{ m}^2$  dentro de la electrónica modular implementada.

En la figura 6.11 puede apreciarse un espectro de posición obtenido para muones, con un tiempo de adquisición de 16 horas. En la misma gráfica aparece un recuadro ampliado mostrando la estructura de alambres asociada al detector, donde la resolución en posición de la región central era de  $\pm 1.45$  mm.



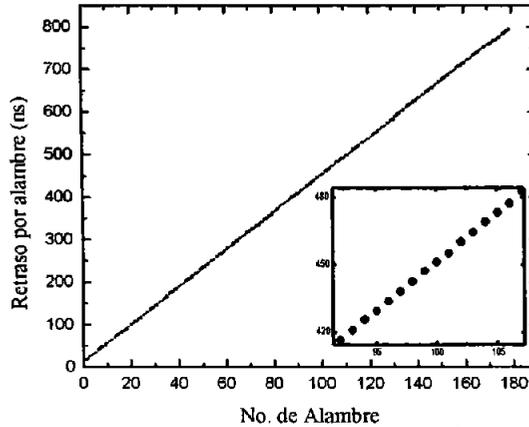
**Figura 6.10** Espectro de posición para partículas  $\beta$  con un delay en el CFD de 18 ns.



**Figura 6.11** Espectro de posición para muones con un delay en el CFD de 18 ns.

Una característica indispensable de este tipo de sistemas de detección está asociada a la linealidad de toda la cadena de retrasos (*delay lines*) implementada, ya que la determinación de la posición en la cual ocurrió un evento está estrechamente ligada con el comportamiento lineal de cada uno de

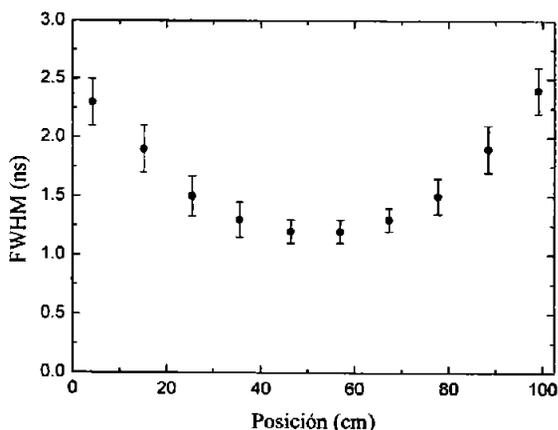
los retardos aplicados, representados por los picos de la figura 6.11. En la figura 6.12 se presenta la distribución de dichos retardos, asociada con este detector, donde el error del ajuste lineal es del 0.002%. En la misma gráfica aparece un recuadro ampliado donde se observa el citado comportamiento lineal.



**Figura 6.12** Comportamiento lineal de los retardos implementados en la cámara multialámbrica.

Otra característica a estudiar en este tipo de sistemas es la resolución en posición de cada uno de los picos formados por la detección de partículas ionizantes. Una forma de cuantificar dicho comportamiento consiste en medir la semi-anchura (FWHM) de las contribuciones individuales de un espectro en particular. En nuestro caso analizamos el espectro de la figura 6.11 tomando en cuenta que la cámara multialámbrica fue diseñada para la detección de muones. El análisis se realizó a 10 picos equidistantes a lo largo del detector, cuyos resultados aparecen en la figura 6.13. Para cada dato de dicha gráfica se calculó el promedio de las cinco semi-anchuras más cercanas.

El comportamiento observado en la figura 6.13 puede entenderse si recordamos la condición bajo la cual se aplicó el retraso  $\delta t$  en el CFD. La propagación del *rise time* a lo largo de la cámara tenía un valor promedio de aproximadamente 30 ns, valor que corresponde al tiempo de formación de las señales existentes a la mitad del detector, región en la cual se tiene la mejor resolución debido al valor de  $t_s$  utilizado para obtener  $\delta t$  (ver Apéndice VII). Ahora bien, la simetría inherente a dicha gráfica resulta de la naturaleza aritmética en la información adquirida, ya que cada dato en el espectro de posición se obtuvo a través de la resta entre las parejas de pulsos estudiados.



**Figura 6.13** Resolución (*FWHM*) como función de la posición para 10 picos equidistantes del espectro obtenido con muones.

Por lo que sólo para parejas de datos de la zona intermedia el *rise time* coincide con el promedio utilizado para la elección del retardo ( $\delta t$ ) en el CFD, mientras que para todo el resto de la región analizada los criterios de discriminación no son óptimos, dando lugar a una menor resolución.

En base al comportamiento observado, decidí investigar posibles formas de análisis que pudieran proporcionar mayor información relacionada con la estructura temporal de cada uno de los pulsos estudiados. Una opción instrumental disponible en nuestro caso consistía en la instrumentación de tarjetas digitalizadoras, capaces de almacenar la forma completa de cada señal correspondiente a la detección de muones. Esta alternativa brindaría la oportunidad de analizar los eventos aún después de haberlos adquirido, estudiando así fuera de línea las probables mejoras a implementar teniendo en cuenta una optimización en la resolución del sistema de detección. La instrumentación y adquisición de señales realizadas para dicho fin se exponen en la siguiente sección.

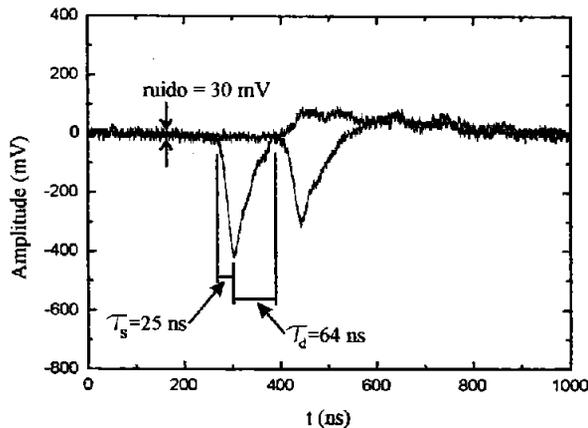
## 6.2 Análisis de señales digitalizadas

El proceso de digitalización propuesto y efectuado para la información generada por radiación cósmica tenía como objetivo principal el de realizar un

estudio detallado de las señales provenientes del sistema de detección para así poder mejorar la resolución hasta ese momento registrada. La opción instrumental de adquirir todos los pulsos y almacenarlos exigía la creación de un programa capaz de analizar las principales características temporales presentes en los eventos registrados.

Una ventaja inherente de la técnica propuesta, consistía en la posibilidad de programar un conjunto de subrutinas posteriores a la etapa experimental, con la flexibilidad suficiente para ajustar distintos parámetros tanto de amplitud como de tiempo, capaces de sustraer la información básica que generalmente no se encuentra de manera directa y accesible en experimentos de Física de altas energías, donde por lo regular, las señales son filtradas y analizadas en módulos electrónicos, perdiéndose de esta manera la oportunidad de tener las formas originales de cada uno de los pulsos generados por la interacción de radiación ionizante en los detectores.

El proceso propuesto no tenía precedentes en experimentos de esta naturaleza, por lo que era obligado involucrar una metodología que incluyera las técnicas básicas de análisis de señales rápidas, garantizando así la aportación de una técnica innovadora y práctica con la capacidad de ofrecer mejores resultados que los obtenidos a través de la instrumentación convencional asociada a la detección de muones en sistemas de gran área como el nuestro.



**Figura 6.14** Señales generadas por la detección de un muón en la cámara multilámbtrica y digitalizadas en el WFD, donde aparece el rise time ( $\tau_r$ ), decay time ( $\tau_d$ ) y la amplitud del ruido asociados a un pulso.

Los datos adquiridos en la etapa de digitalización fueron guardados en formato ASCII, teniendo los dos pulsos en columnas independientes de 4992 valores cada una, registrados como pareja de señales para cada evento detectado, como se ilustra en la figura 6.14, donde también se muestran sus principales características. En dicho proceso se almacenaron alrededor de 300,000 eventos, estadística razonable para realizar un estudio detallado de los mismos. La frecuencia de adquisición con esta configuración experimental era de aproximadamente 80 Hz.

Dicha información exigía un proceso de filtración, ajuste y análisis, necesarios para aplicar los parámetros temporales destinados a obtener una resolución en posición que mostrase un avance y la conveniencia de aplicar la citada técnica aún después de haber realizado la detección de muones.

La metodología escogida para estudiar los pulsos digitalizados estaba fundamentada en técnicas aplicadas para discriminar señales con *rise time* del orden de unos cuantos nanosegundos, cuyas bases se remontan a los primeros módulos electrónicos diseñados para optimizar la resolución temporal de detectores de centelleo [43]. Dichas técnicas posteriormente extendieron sus aplicaciones a experimentos de detección donde la discriminación de información temporal constituía una prioridad. Los resultados de los mencionados estudios son aplicados generalmente diseñando e instrumentando determinadas mejoras en parámetros específicos [41, 42], de acuerdo con las necesidades experimentales asociadas con la radiación a detectar.

En nuestro caso, la programación incluiría en principio etapas de filtración, ajuste de nivel de base, adición de pedestales, medición de *rise time*, búsqueda de fluctuaciones, sustracción de eventos espurios, determinación de posición temporal, aritmética digital, conversión de formatos, e interfases gráficas destinadas al monitoreo y despliegue de información analizada. Por tratarse de una técnica aplicada fuera de línea, se contó con la oportunidad de escribir rutinas flexibles con parámetros variables, que permitieron obtener los datos con características temporales que mejor se ajustaban a las condiciones experimentales del sistema de detección en conjunto.

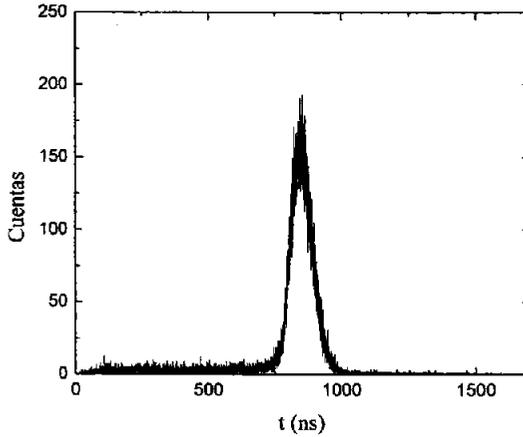
Los conjuntos de señales previamente digitalizadas fueron analizadas durante todo el proceso de estudio con el lenguaje Labview 6.1 de *National Instruments* (ver Apéndice VIII) en una computadora con procesador de 2 GHz. La elección de este lenguaje obedeció a las características del ambiente gráfico de programación que permite la creación de instrumentos virtuales y subrutinas capaces de procesar señales analógicas y digitales para el estudio de sus principales características temporales y de amplitud.

Para obtener la información temporal necesaria, fue creado un sistema de algoritmos, que en ciertas etapas de análisis emulaba las principales funciones de un módulo de discriminación por fracción constante (CFD), elemento electrónico generalmente utilizado en la instrumentación convencional de este tipo de experimentos. Las señales a estudiar eran leídas como parejas de datos, con 4992 valores cada una, lo cual correspondía a un intervalo total de 998.4 ns por pulso.

En una primera etapa, a cada columna de datos le era sumada o sustraída una cantidad constante, con la finalidad de nivelar cada señal respecto a una referencia base. Después, se aplicaba una subrutina de búsqueda de picos con umbral mínimo de 50 mV, logrando con ello seleccionar los pulsos con información relevante asociada a la detección de muones, y descartando los eventos espurios sin señales por encima del límite mencionado. Posteriormente, en caso de que ambos pulsos contaran con picos por encima del umbral, éstos eran llevados a la etapa donde sería emulado vía software el funcionamiento del CFD.

Si recordamos los principios de discriminación por fracción constante (ver Apéndice VII), al pulso original se le suma una “copia” desfasada cierta cantidad de tiempo  $\delta t$ , y disminuida en amplitud por una fracción  $f$ . Dentro del análisis digital, las operaciones aritméticas se efectuaron directamente en los valores correspondientes al pulso en cuestión, mientras que los retardos temporales se conseguían desfasando la cantidad de “canales” asociados con el retraso, teniendo en cuenta que cada “canal” representaba la digitalización de un dato cada 200 ps.

Una vez sumados ambos pulsos, el original y su “copia”, se procedió a localizar el mínimo local de la señal resultante, para a partir de ese punto situar el dato donde la forma de onda cruzaba por el valor cero. Antes de localizar dicha región, fue aplicado un filtro con el objetivo de eliminar fluctuaciones debidas al ruido intrínseco de la señal adquirida. El filtro obtenía la media a partir de un conjunto de datos, consiguiendo con dicho proceso “suavizar” la forma de la señal. De esta manera se contaba con la posición en tiempo de cada uno de los dos pulsos originados por la detección de un muón. Al obtener la mencionada pareja de datos, procedimos a sumarlos entre ellos con el objetivo de fijar una condición de análisis relacionada con la propiedad de que la adición de dichas posiciones en tiempo siempre es una constante, igual al retardo total de la cámara multialámbrica.



**Figura 6.15** Espectro asociado a la suma de eventos digitalizados y generados por muones en la cámara multialámbrica.

En caso de que la suma no diera como resultado un valor entre 814 ns y 882 ns, la pareja de datos no se consideraba para un ulterior procesamiento. En la figura 6.15 se muestra el resultado de la suma realizada para cada pareja de eventos tras haber aplicado la técnica de discriminación por software. A dicha gráfica le fue ajustada una curva de tipo gaussiana con el objetivo de calcular la semi-anchura, cuyo valor fue  $\sigma = 34$  ns. Dicho valor fue el utilizado para fijar la condición de ventana temporal (de 814 ns a 882 ns) discutida anteriormente. De esta manera, era desechado para análisis cualquier evento de origen espurio que no cumpliera con dichos valores.

La dispersión estadística observada en la figura 6.15 obedece a las contribuciones de los detectores involucrados en la adquisición de datos. Por un lado, la determinación de un inicio absoluto por parte de los centelleadores se ve afectado por el camino de los pulsos luminosos generados por el paso de un muón, los cuales atraviesan distintos caminos ópticos antes de llegar al sistema de fotomultiplicación. Mientras que la adición de retardos implicados a lo largo de la cámara multialámbrica también sufrían una propagación temporal asociada al error intrínseco de cada unidad de retardo. De manera analítica, podemos recurrir a las ecuaciones (6.1) para expresar dicho comportamiento de la siguiente forma:

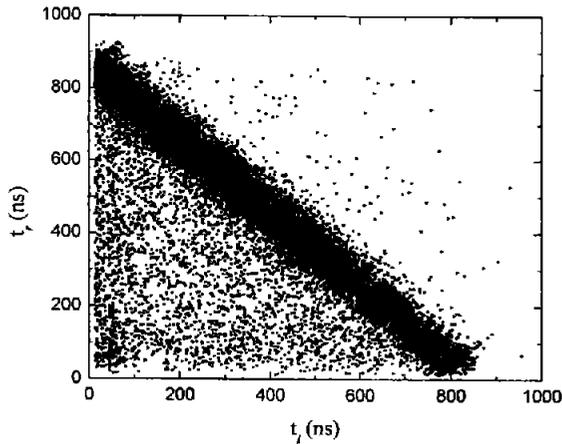
$$t_r + t_l = 2(t_{sc} + t_p - t_{wc}) + N\Delta t \quad \dots \quad (6.4)$$

donde  $N=(n_r + n_l)$  es el número total de unidades de retardo, mientras que el resto de los términos fueron explicados en la sección 6.1.2.

La pareja de datos a partir de este punto aún necesitaban ser restados entre ellos y posteriormente sumarles una cantidad constante (4992 en nuestro caso) para obtener un espectro de posición similar al que aparece en la figura 6.11. Sin embargo, el análisis de las parejas de datos en modo evento también arrojaba información valiosa que más adelante será comentada.

En nuestro caso, el hecho de que la presente técnica pudiera ser aplicada fuera de línea, aún después de haber realizado la detección directa de muones por el sistema, brindaba la oportunidad de experimentar, por medio de la programación, con la aplicación de un intervalo grande de distintos parámetros, comprobando de esta manera la validez de la discriminación por fracción constante en datos analizados con software, así como la viabilidad de optimizar el estudio temporal de los pulsos involucrados.

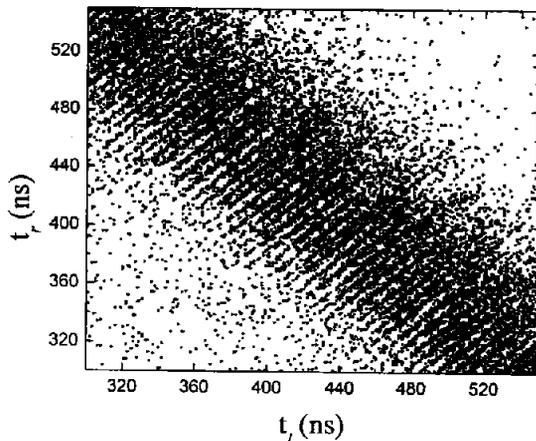
Posteriormente, el estudio de pulsos vía software fue realizado únicamente entre cada par de datos en modo evento. Es decir, cada pareja de datos era relacionada en dos dimensiones, obteniéndose una distribución como la que aparece en la figura 6.16. Donde la estructura de datos con pendiente negativa obedece a la ecuación 6.4.



**Figura 6.16** Espectro de posición bidimensional de  $t_r$  vs  $t_l$  para detección de muones.

En la figura 6.17 se muestra una ampliación del mismo espectro bidimensional, donde puede observarse la estructura de alambres asociada al

detector, cuya distribución formada por conjuntos de datos con pendientes positivas puede expresarse con la ecuación 6.3 ( $t_r - t_l = n\Delta t$ ).



**Figura 6.17** Sección ampliada del espectro de posición bidimensional de  $t_r$  vs  $t_l$  para detección de muones.

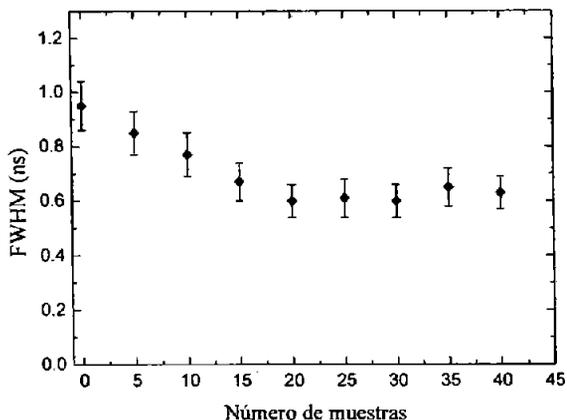
Es útil recordar que las dimensiones temporales de ambos ejes en las figuras 6.16 y 6.17, se obtuvieron considerando el retardo total (*delay lines*) presente entre el primer y último alambre activos del detector ( $\sim 850$  ns), y asociándolo linealmente con el número de canales registrados.

Una vez comprobada la eficiencia de nuestra técnica de discriminación por software para obtener una separación gráfica entre cada una de las secciones correspondientes a las señales de los alambres de la cámara multialámbrica, decidí efectuar la resta entre las parejas de valores  $t_r$  y  $t_l$ , para después sumar una cantidad constante (4992) con el fin de obtener siempre resultados positivos, para finalmente a través de un histograma construir el espectro asociado.

El diagrama de bloques o código fuente del programa escrito en LabVIEW, así como la explicación detallada de las subrutinas utilizadas durante todo el proceso de análisis se muestra en el Apéndice IX.

Cabe mencionar que debido a la flexibilidad de nuestra técnica, se tuvo la oportunidad de variar parámetros relacionados con la forma en que se procesaba la información digitalizada, que arrojaba las posiciones de cada evento respecto al inicio o *trigger* generado por los detectores de centelleo.

Los valores que mostraron tener una influencia considerable en la resolución de los espectros de posición generados fueron la fracción constante de discriminación  $f$ , el número de datos utilizados por el filtro digital, el retardo  $\delta t$  aplicado al CFD por software y la condición de la ventana temporal. Los valores para  $f$  comúnmente instrumentados y aquí probados oscilaron entre 0.2 y 0.5, aunque los mejores resultados en cuanto a resolución se obtuvieron con  $f=0.4$ .

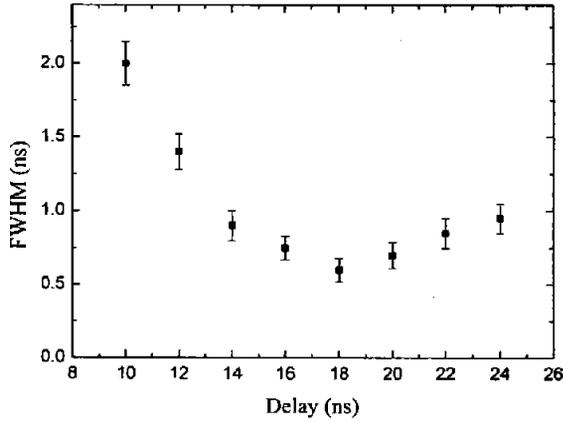


**Figura 6.18** Dependencia de la resolución (en una región central del espectro) como función del número de muestras evaluadas, utilizando  $f=0.4$  y  $\delta t=18$  ns.

Para el número de datos evaluados por el filtro pudimos obtener espectros de posición variando dicho parámetro, observando mejores resultados en el caso de 20 muestras analizadas. El resultado de tal análisis aparece en la figura 6.18. Cabe recordar que cada dato representa el promedio de cinco semi-anchuras ubicadas en la región central para cada espectro estudiado.

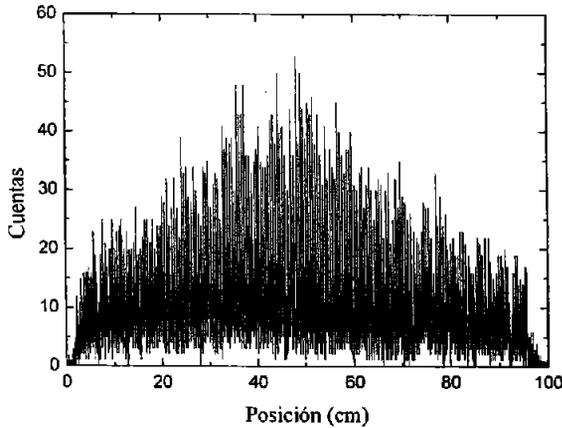
En el caso del retardo  $\delta t$ , los valores para este parámetro variaron desde 10 ns hasta 24 ns, teniendo la mejor resolución en el caso de  $\delta t = 18$  ns. Una muestra de dicho comportamiento aparece en la figura 6.19.

En lo que concierne a la ventana temporal aplicada durante el algoritmo, pudo comprobarse que la resolución temporal era mejorada en un 14% como resultado de dicha condición.



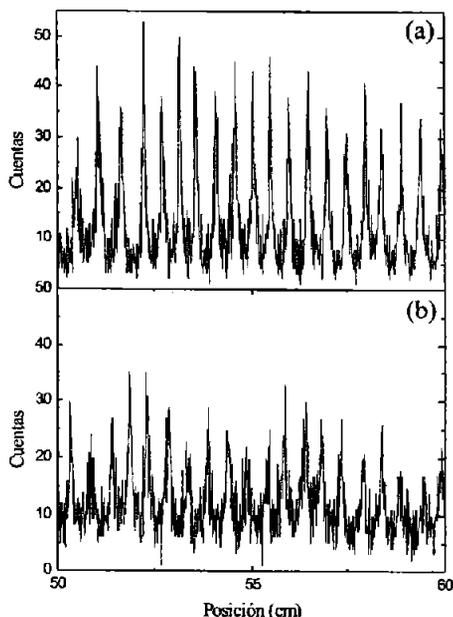
**Figura 6.19** Dependencia de la resolución (en una región central del espectro) como función del retardo aplicado (delay), utilizando  $f=0.4$  y filtraje cada 20 muestras.

El resultado de aplicar los mejores parámetros al algoritmo propuesto se muestra en la figura 6.20, donde la resolución en posición de la región central era de  $\pm 0.75$  mm.



**Figura 6.20** Espectro de posición para muones obtenido con la técnica de discriminación por software.

Un estudio detallado de las semi-anchuras de los espectros construidos, que se traducía en una cuantificación de la resolución en posición mostró que la mejor resolución se obtenía para  $f = 0.4$  y  $\delta t = 18$  ns, valores previamente predichos al aplicar la ecuación A.1, y utilizados para la obtención del espectro de la figura 6.20, teniendo en consideración el *rise time* de los pulsos procesados (ver Apéndice VII). En la figura 6.21 se muestran secciones ampliadas de los espectros de posición para muones, comparando los datos analizados con la técnica por software y los adquiridos experimentalmente con la instrumentación descrita en la sección 6.1.2.



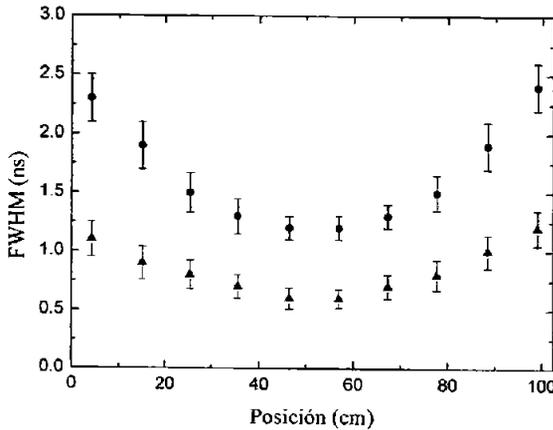
**Figura 6.21** Sección ampliada de los espectros de posición para muones a través de (a) el procesamiento digital de la sección 6.2, y (b) con el procedimiento convencional de la sección 6.1.2.

Al medir la semi-anchura (FWHM) para 10 picos equidistantes del espectro de la figura 6.20 fue posible conocer la resolución alcanzada tras el procesamiento digital propuesto, lo cual puede observarse en la figura 6.22.

La dependencia observada de la resolución como función de la posición para la información procesada de manera digital sigue un comportamiento similar al de su contraparte asociada con la instrumentación convencional. Aquí se pone de manifiesto nuevamente el origen aritmético del espectro de la figura 6.20, el cual fue construido al restar las parejas de pulsos analizados. De

esta manera, el promedio en el *rise time* de los pulsos involucrados (18 ns) arroja un mejor ajuste analítico respecto a la ecuación A.1 (Apéndice VII) en la parte central del espectro, mientras que la variación simétrica obedece al proceso de sustracción antes mencionado.

Como resultado de la digitalización de las señales detectadas por la interacción de muones y la posterior aplicación de nuestra técnica de discriminación por software, fue posible conseguir una mejora en la resolución (FWHM) de aproximadamente 50% para el caso de espectros de posición.



**Figura 6.22** Resolución en posición (FWHM) para 10 picos equidistantes. Los círculos corresponden a la adquisición con instrumentación estándar, mientras que los triángulos representan la técnica de discriminación por software.

Esta optimización está ligada con la manipulación digital aplicada a los pulsos adquiridos, de manera que cada conjunto de eventos pudo ser estudiado variando los principales parámetros involucrados, además de contar con la posibilidad de filtrar las señales procesadas, ayudando a determinar las respectivas posiciones de forma más precisa, eliminando en la medida de lo cuantificable, las distintas contribuciones de origen espurio incluidas en cada uno de los pulsos generados por el paso de un muón.

Otra implementación que contribuyó a un mejor procesamiento fue la condición que consistió en desechar para su ulterior análisis todos aquellos eventos que no cumplieran con los valores de la ventana temporal ( $\sigma$ ) calculada a partir de la suma de eventos digitalizados (Fig. 6.15). Eliminando

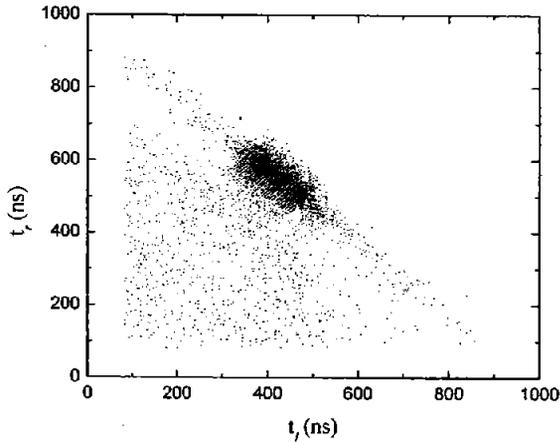
así la mayoría de las señales provocadas por fluctuaciones de voltaje, eventos espurios no originados por radiación cósmica y descargas eléctricas, las cuales presentaban una frecuencia aproximada de 1 por cada 1000 eventos.

### 6.2.1 Señales de triple coincidencia

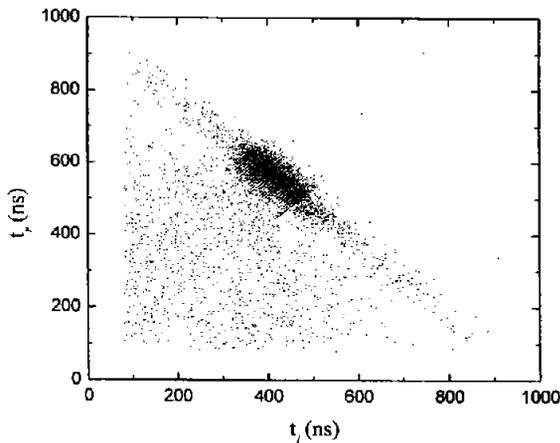
Tras la digitalización de pulsos y habiendo desarrollado una técnica de discriminación por software capaz, no solamente de reproducir la información adquirida con instrumentación convencional, sino con la característica de producir resultados que ayudaron a optimizar la resolución en posición para la detección de muones, decidí aplicar dicho proceso digital a los pulsos adquiridos durante el experimento de triple coincidencia expuesto en la sección 5.4.4.1. Recordemos que la meta al realizar estas mediciones, era la de cuantificar las diferencias encontradas, en caso de existir, entre los espectros bidimensionales para cada posición escogida, los cuales contienen toda la información temporal asociada al sistema de detección en conjunto.

En caso de producirse atenuaciones o propagaciones tanto en amplitud como en tiempo de las señales detectadas en la parte central y en un extremo de la cámara multialámbrica, éstas arrojarían como consecuencia diferentes espectros bidimensionales, lo cual se traduciría en una falta de homogeneidad en la respuesta del detector a lo largo de la dirección de los alambres del ánodo. Dicha caracterización completaba el estudio del sistema de detección en lo referente a su sensibilidad respecto a la posición, a lo largo de los dos ejes, teniendo así un conocimiento sólido en cuanto al desempeño de la cámara multialámbrica ante muones, además de representar una valiosa oportunidad para aplicar nuestra técnica desarrollada de discriminación por software.

Los pulsos almacenados durante dicho experimento fueron sometidos al mismo proceso digital descrito en la sección anterior. Es decir, las señales eran procesadas por medio de la técnica de discriminación por software, aplicando  $\delta t = 18 \text{ ns}$  y  $f = 0.4$ . Con el fin de obtener un espectro de posición bidimensional bastaba con guardar las parejas de valores correlacionados ( $t_r$  y  $t_l$ ), para después graficar la información correspondiente a las posiciones elegidas en el experimento. La comparación de tales espectros bidimensionales aparece en la figura 6.23.



a)



b)

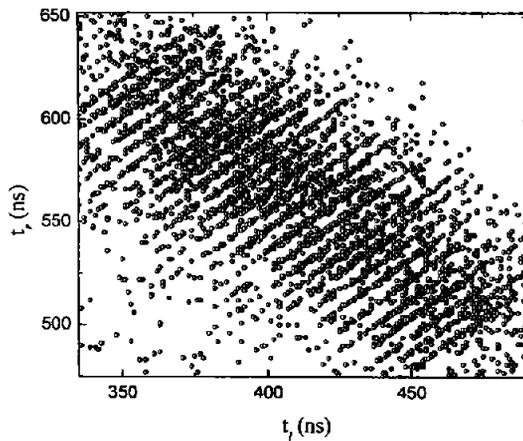
**Figura 6.23** a) *Espectro de posición bidimensional para el experimento de triple coincidencia en la mitad del detector.* b) *Espectro de posición bidimensional a un extremo del detector.*

En esta ocasión, al graficar los eventos adquiridos mediante triple coincidencia (Fig. 6.23), puede observarse claramente el espectro

bidimensional producido, correspondiente al área proyectada del pequeño centelleador colocado para dicho experimento sobre la cámara multialámbrica.

La distribución en ambos casos no presenta una diferencia apreciable en la densidad o geometría de dichos espectros, por lo que la homogeneidad en la detección y generación de señales al paso de un muón garantiza una uniformidad de información producida, independientemente de la posición a lo largo de un alambre en el cual se haya producido la ionización. En ambos casos está presente la estructura de alambres característica de la cámara, que puede apreciarse en la figura 6.24.

Como resultado de la triple coincidencia impuesta en esta etapa experimental, fue posible cuantificar la eficiencia de detección del dispositivo multialámbrico, que representa la relación de eventos detectados por la cámara entre el número de *triggers* generados por los centelleadores. Dicha eficiencia tuvo un valor del 94%.



**Figura 6.24** Sección ampliada del espectro de posición bidimensional para el experimento de triple coincidencia en la mitad del detector.

## Capítulo 7

### Conclusiones

1.- Se diseñó y construyó un sistema de detección para muones de alta energía, formado por dos detectores de centelleo y una cámara multialámbrica. Las principales características de ésta última son:

- a) Resolución en posición de  $\pm 0.75$  mm. Con un área activa de 1 m x 1 m.
- b) Eficiencia de detección del 94 %.
- c) Método de lectura electrónica a través de una cadena de líneas de retardo acopladas al ánodo.
- d) Posibilidad de lectura con *triggers* generados por doble coincidencia en centelleadores (rayos cósmicos) o por el disparo del cátodo (partículas  $\beta$ ).
- e) Estructura diseñada siguiendo las especificaciones eléctricas, mecánicas y geométricas, para su ulterior implementación en el sitio arqueológico de Teotihuacan.
- f) Construcción del sistema con materiales de bajo costo y cuyas características lo convierten en un detector de fácil reparación.

2.- La instrumentación de una tarjeta digitalizadora sirvió para llevar a cabo un estudio detallado de eventos adquiridos por la detección de rayos cósmicos en el sistema construido. El desarrollo de nuestra técnica por software, escrita en LabVIEW, con rutinas que emulaban las principales funciones de discriminación por fracción constante a través de un método digital permitió analizar los pulsos adquiridos y mejorar con nuestro método hasta en un 50% la resolución en posición de los espectros asociados, respecto a los datos adquiridos mediante la instrumentación electrónica estándar (analógica).

3.- El método de análisis por software aquí propuesto fue refinado tras el estudio de parámetros que influían directamente en las características temporales de los espectros generados con dicho proceso. Los factores evaluados que contribuyeron a mejorar la resolución en posición, junto con los valores que optimizaban su inclusión, fueron los siguientes:

- a) Retraso  $\delta t$  aplicado al CFD = 18 ns
- b) Número de muestras evaluadas por el filtro digital = 20
- c) Constante de discriminación utilizada por el CFD = 0.4
- d) Condición temporal o ventana  $\sigma$  para eliminar eventos espurios = 814 ns  $\rightarrow$  882 ns

4.- Nuestro método basado en algoritmos de análisis digital representa una alternativa instrumental práctica aplicable en sistemas de detección para muones de gran área con sistemas de lectura a través de líneas de retardo para el estudio de estructuras con grandes volúmenes de materia.

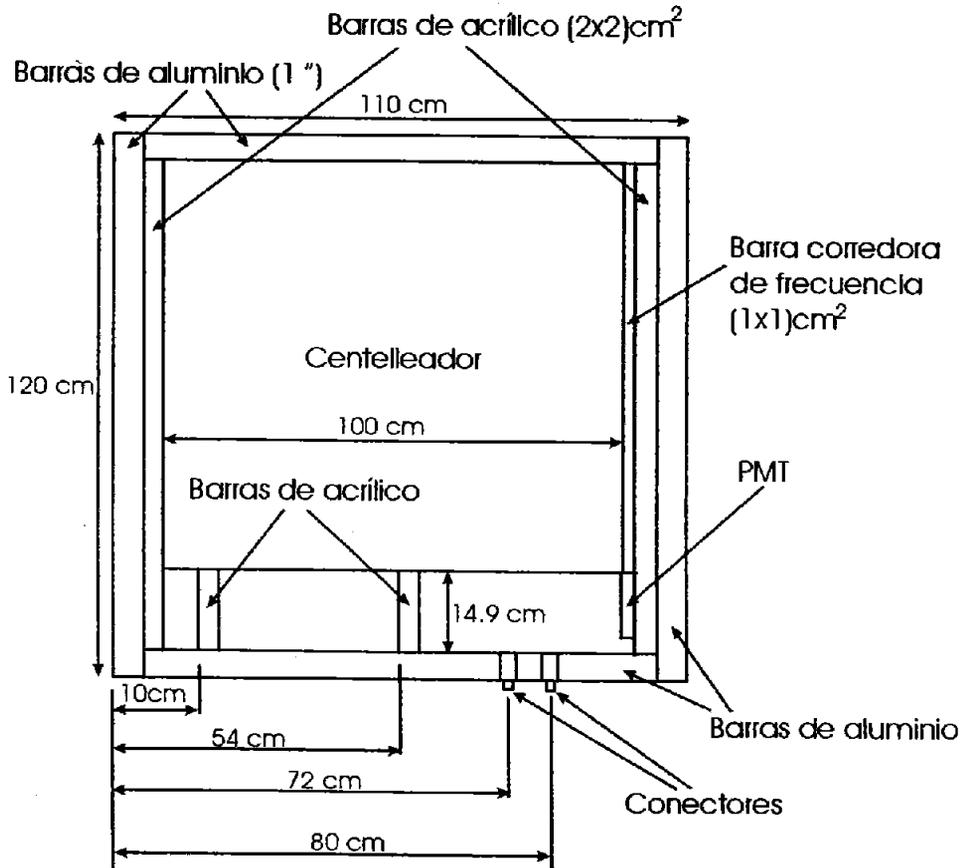
5.- La experiencia adquirida durante el proyecto citado, sirvió para acumular una serie de recomendaciones y sugerencias mecánicas, instrumentales y electrónicas, necesarias para optimizar el rendimiento, eficiencia y resolución del detector multialámbrico construido, las cuales se enuncian a continuación.

- a) Diseño de dobles puntos de soldadura en el circuito del ánodo para los alambres, logrando con ello un mejor contacto electrónico y mecánico, evitando así la ruptura de los mismos.
- b) Construcción de la placa de circuito electrónico del ánodo en una sola pieza, logrando con ello mejor continuidad electrónica, menor ruido y una adhesión uniforme completa respecto al marco de aluminio.
- c) Utilización de tornillos de mayor diámetro (3/16 ") colocados a menores distancias entre sí en toda la estructura (tapas y marco), así como el uso de O-ring (sello de goma) con mayor grosor (2 mm) con el objetivo de minimizar el escape de gas.
- d) Acondicionamiento eléctrico aplicando voltajes de hasta  $-3000$  V con la cámara multialámbrica abierta, con la finalidad de localizar, a través de la vibración, alambres flojos o defectuosos a lo largo del ánodo.
- e) Implementación de unidades de retardo con *delay*  $> 4$  ns y módulos TDC con rangos mayores de  $1 \mu\text{s}$ , obteniendo de esta forma espectros con una resolución en posición que no se vea afectada por el tiempo de tránsito de las señales en los alambres ( $\sim 3$  ns).

6.- En este trabajo se desarrollaron técnicas que además de permitir construir sistemas de detección para rayos cósmicos, hacen viable la construcción de distintos tipos de detectores de gas que puedan ser aplicados a otros experimentos con fines diferentes.

## Apéndice I

### *Estructura contenedora de los detectores de centelleo*



Las barras de acrílico utilizadas tenían una sección transversal de  $(2 \times 2) \text{ cm}^2$ , para las barras de aluminio la sección era de  $(1 \times 1)$  pulgadas cuadradas. En tanto que la barra corredora de frecuencia tenía una sección de  $(1 \times 1) \text{ cm}^2$ . Las tapas superior e inferior de cada estructura eran placas de aluminio con un grosor de  $1/8$  ”.

## **Apéndice II**

*Hojas de especificaciones técnicas de las líneas de retardo:*

*TYB98-5*

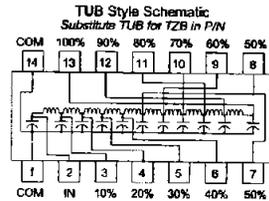
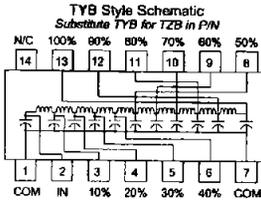
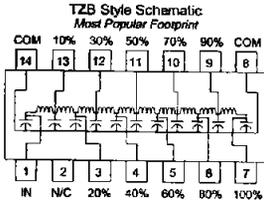
*y*

*SIP5-405*

# TZB-TYB-TUB Series 10-Tap High Performance Passive Delays

- Fast Rise Time, Low DCR
- High Bandwidth  $\approx 0.35/t$
- Low Distortion LC Network
- 10 Equal Delay Taps
- Standard Impedances: 50 - 75 - 100 - 200  $\Omega$
- Stable Delay vs. Temperature: 100 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- Operating Temperature Range -55 $^{\circ}\text{C}$  to +125 $^{\circ}\text{C}$

- Operating Specifications - *Passive Delay Lines*
- Pulse Overshoot (Pos) ..... 5% to 10%, typical
  - Pulse Distortion (S) ..... 3% typical
  - Working Voltage ..... 25 VDC maximum
  - Dielectric Strength ..... 100VDC minimum
  - Insulation Resistance ..... 1,000 M $\Omega$  min. @ 100VDC
  - Temperature Coefficient ..... 100 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ , typical
  - Bandwidth ( $f_c$ ) ..... 0.35/t, approx.
  - Operating Temperature Range ..... -55 $^{\circ}$  to +125 $^{\circ}\text{C}$
  - Storage Temperature Range ..... -65 $^{\circ}$  to +150 $^{\circ}\text{C}$



## Electrical Specifications at 25 $^{\circ}\text{C}$

Low-profile DIP/SMD versions refer to AIZ Series !!!

Delay Tolerances	50 Ohm Part Number	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	75 Ohm Part Number	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	100 Ohm Part Number	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	200 Ohm Part Number	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)
5 $\pm$ 0.5	TZB1-5	2.0	0.7	TZB1-7	2.1	0.8	TZB1-10	2.2	0.8	TZB1-20	2.4	0.9
10 $\pm$ 0.7	TZB6-5	3.2	0.7	TZB6-7	3.6	0.8	TZB6-10	3.8	0.8	TZB6-20	5.5	1.0
20 $\pm$ 1.0	TZB12-5	4.0	0.7	TZB12-7	4.4	1.3	TZB12-10	4.6	1.5	TZB12-20	8.5	1.5
25 $\pm$ 1.25	TZB18-5	4.5	0.9	TZB18-7	5.3	1.5	TZB18-10	5.5	1.7	TZB18-20	9.0	1.8
30 $\pm$ 1.5	TZB24-5	5.5	1.0	TZB24-7	5.8	1.7	TZB24-10	5.8	2.0	TZB24-20	10.0	2.0
40 $\pm$ 2.0	TZB30-5	7.0	1.2	TZB30-7	7.5	2.0	TZB30-10	7.5	2.2	TZB30-20	13.0	2.2
50 $\pm$ 2.5	TZB36-5	8.5	1.3	TZB36-7	8.5	2.1	TZB36-10	8.5	2.3	TZB36-20	15.5	2.4
60 $\pm$ 3.0	TZB42-5	10.5	1.6	TZB42-7	11.4	2.3	TZB42-10	11.5	2.5	TZB42-20	16.0	2.5
70 $\pm$ 3.5	TZB48-5	11.0	1.7	TZB48-7	13.0	2.5	TZB48-10	13.0	2.8	TZB48-20	17.0	2.5
80 $\pm$ 4.0	TZB54-5	12.0	1.9	TZB54-7	15.3	3.8	TZB54-10	15.5	3.0	TZB54-20	19.0	2.5
90 $\pm$ 4.5	TZB60-5	14.0	2.0	TZB60-7	17.3	3.0	TZB60-10	17.5	3.1	TZB60-20	20.0	2.5
100 $\pm$ 5.0	TZB66-5	18.0	2.1	TZB66-7	19.5	3.1	TZB66-10	20.0	3.2	TZB66-20	24.0	2.5
150 $\pm$ 7.50	TZB72-5	24.0	2.2	TZB72-7	26.0	3.3	TZB72-10	26.0	3.5	TZB72-20	35.0	3.6
200 $\pm$ 10.0	TZB78-5	34.0	2.4	TZB78-7	38.0	3.4	TZB78-10	39.0	3.5	TZB78-20	44.0	4.8
250 $\pm$ 12.5	TZB84-5	41.0	2.4	TZB84-7	45.0	3.5	TZB84-10	46.0	4.0	TZB84-20	56.0	5.2
300 $\pm$ 15.0	TZB90-5	48.0	2.5	TZB90-7	53.0	3.5	TZB90-10	54.0	4.2	TZB90-20	68.0	5.8
400 $\pm$ 20.0	TZB94-5	65.0	2.8	TZB94-7	66.0	3.6	TZB94-10	67.0	4.5	---	---	---
500 $\pm$ 25.0	TZB98-5	75.0	3.3	TZB98-7	84.0	3.7	TZB98-10	86.0	5.0	---	---	---

1. Rise Times are measured from 10% to 90% points.
2. Delay Times measured at 50% points of leading edge.
3. Output (100% Tap) terminated to ground through  $R_L = Z_0$ .

## P/N Description

Passive 10 Tap Thru-hole  
14-pin Delay Module Series

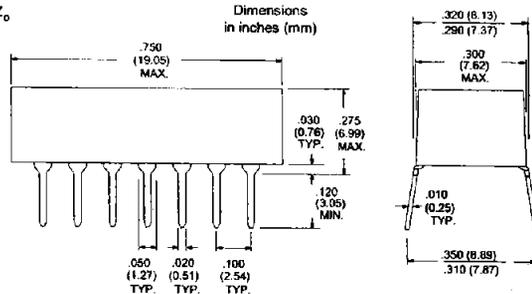
Delay Coding Number  
Per Table above

Impedance Specifier:  
50 Ohms = 5  
75 Ohms = 7  
100 Ohms = 10  
200 Ohms = 20

## Part Number Examples:

- TZB6-10 = 10 ns, 1 ns / tap, 100  $\Omega$ , 14-pin
- TZB18-7 = 25 ns, 2.5 ns / tap, 75  $\Omega$ , 14-pin
- TZB98-5 = 500 ns, 50 ns / tap, 50  $\Omega$ , 14-pin

TZB XX - XX



Specifications subject to change without notice.

For other values & Custom Design, contact factory.

www.rhombus-ind.com

sales@rhombus-ind.com

TEL: (714) 898-0960

FAX: (714) 896-0971

**rhombus industries inc.**

# SIP4 & SIP5 Series High Performance Passive Delay Modules

- Fast Rise Time, Low DCR
- High Bandwidth  $\approx 0.35/t$
- Low Distortion LC Network
- 5 or 10 Equal Delay Taps
- Standard Impedances: 50 - 75 - 100 - 200  $\Omega$
- Stable Delay vs. Temperature: 100 ppm/°C
- Operating Temperature Range -55°C to +125°C

## Operating Specifications - Passive Delay Lines

Pulse Overshoot (Pos)	5% to 10%, typical
Pulse Distortion (S)	3% typical
Working Voltage	25 VDC maximum
Dielectric Strength	100VDC minimum
Insulation Resistance	1,000 M $\Omega$ min. @ 100VDC
Temperature Coefficient	100 ppm/°C, typical
Bandwidth (f <sub>c</sub> )	0.35/t, approx.
Operating Temperature Range	-55° to +125°C
Storage Temperature Range	-65° to +150°C

## Electrical Specifications at 25°C

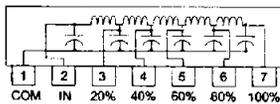
Delay Tolerances Total (ns)	Tap-to-Tap (ns)	50 Ohm 5-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	75 Ohm 5-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	100 Ohm 5-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	200 Ohm 5-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)
5 ± 0.5	1.0 ± 0.4	SIP4-55	2.0	0.7	SIP4-57	2.7	0.8	SIP4-51	3.0	0.8	SIP4-52	3.0	0.9
10 ± 1.0	2.0 ± 0.5	SIP4-105	4.0	0.7	SIP4-107	4.4	1.3	SIP4-101	4.6	1.3	SIP4-102	6.3	1.5
15 ± 1.0	3.0 ± 0.6	SIP4-155	5.5	1.0	SIP4-157	5.8	1.6	SIP4-151	5.8	1.6	SIP4-152	7.7	2.0
20 ± 1.0	4.0 ± 0.8	SIP4-205	6.4	1.2	SIP4-207	7.3	1.7	SIP4-201	7.5	1.7	SIP4-202	9.8	2.2
25 ± 1.25	5.0 ± 1.0	SIP4-255	8.0	1.3	SIP4-257	8.0	1.9	SIP4-251	8.0	1.9	SIP4-252	15.5	2.4
30 ± 1.5	6.0 ± 1.5	SIP4-305	9.0	1.6	SIP4-307	8.5	2.2	SIP4-301	8.5	2.2	SIP4-302	16.0	2.8
40 ± 2.0	8.0 ± 2.0	SIP4-405	11.0	1.9	SIP4-407	15.5	2.7	SIP4-401	15.5	2.8	SIP4-402	17.0	3.4
50 ± 2.5	10.0 ± 2.0	SIP4-505	14.0	2.1	SIP4-507	17.8	2.9	SIP4-501	18.0	3.1	SIP4-502	19.0	4.0
75 ± 3.75	15.0 ± 3.5	SIP4-755	23.0	2.2	SIP4-757	25.7	3.3	SIP4-751	26.0	3.4	-	-	-
100 ± 5.0	20.0 ± 4.0	SIP4-1005	33.0	2.4	SIP4-1007	34.0	3.6	SIP4-1001	34.0	3.7	-	-	-

Delay Tolerances Total (ns)	Tap-to-Tap (ns)	50 Ohm 10-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	75 Ohm 10-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	100 Ohm 10-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)	200 Ohm 10-Tap P/N	Rise Time (ns)	DCR max. (Ohms)
5 ± 0.5	0.5 ± 0.2	SIP5-55	2.0	0.7	SIP5-57	2.1	0.8	SIP5-51	2.2	0.8	SIP5-52	2.4	0.9
10 ± 0.7	1.0 ± 0.4	SIP5-105	3.2	0.7	SIP5-107	3.6	0.8	SIP5-101	3.8	0.8	SIP5-102	5.5	1.0
15 ± 1.0	1.5 ± 0.5	SIP5-155	3.4	0.8	SIP5-157	4.1	1.2	SIP5-151	4.1	1.3	SIP5-152	6.3	1.5
20 ± 1.0	2.0 ± 0.5	SIP5-205	4.0	0.8	SIP5-207	4.4	1.3	SIP5-201	4.6	1.5	SIP5-202	8.5	1.5
25 ± 1.25	2.5 ± 0.5	SIP5-255	4.5	0.9	SIP5-257	5.3	1.5	SIP5-251	5.5	1.7	SIP5-252	9.0	2.2
30 ± 1.5	3.0 ± 0.6	SIP5-305	5.5	1.0	SIP5-307	5.8	1.7	SIP5-301	5.8	2.0	SIP5-302	10.0	2.4
40 ± 2.0	4.0 ± 1.0	SIP5-405	7.0	1.2	SIP5-407	7.5	2.0	SIP5-401	7.5	2.2	SIP5-402	13.4	3.0
50 ± 2.5	5.0 ± 1.0	SIP5-505	8.5	1.3	SIP5-507	8.5	2.1	SIP5-501	8.5	2.3	SIP5-502	15.5	3.3
60 ± 3.0	6.0 ± 1.5	SIP5-605	10.5	1.6	SIP5-607	11.4	2.3	SIP5-601	11.5	2.5	SIP5-602	16.2	3.6
75 ± 3.75	7.5 ± 1.5	SIP5-755	11.6	1.9	SIP5-757	15.0	2.8	SIP5-751	15.3	3.0	SIP5-752	19.1	3.8
100 ± 5.0	10.0 ± 2.0	SIP5-1005	18.0	2.1	SIP5-1007	19.5	3.1	SIP5-1001	20.0	3.2	SIP5-1002	24.0	4.4

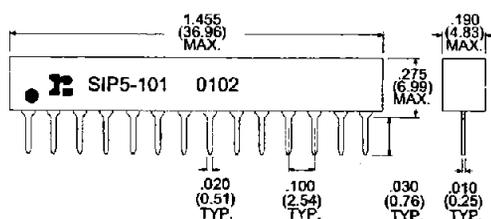
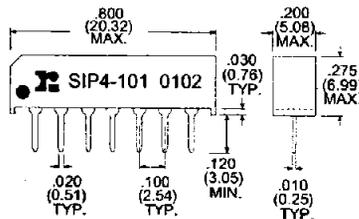
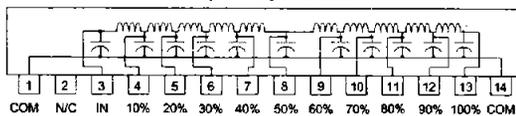
1. Rise Times are measured from 10% to 90% points.
2. Delay Times measured at 50% points of leading edge.
3. Output (100% Tap) terminated to ground through R<sub>L</sub>=Z<sub>0</sub>.

Low-profile DIP/SMD versions refer to AIZ & AMZ Series !!!

5-Tap SIP4 Style Schematic



10-Tap SIP5 Style Schematic



Specifications subject to change without notice.

For other values & Custom Designs, contact factory.

www.rhombus-ind.com

sales@rhombus-ind.com

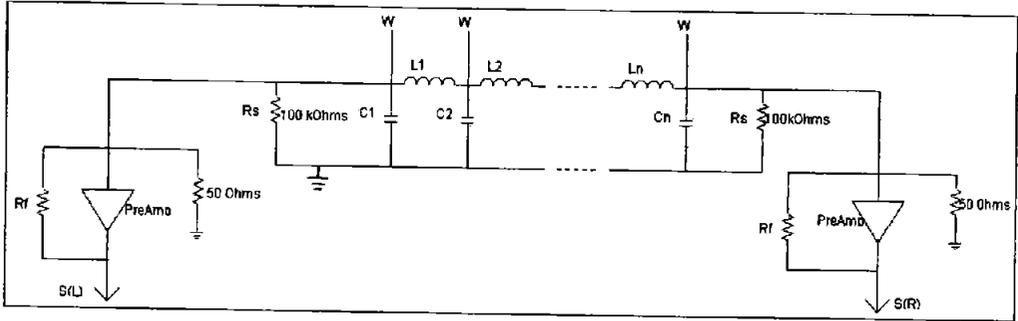
TEL: (714) 898-0960

FAX: (714) 896-0971

**rhombus industries inc.**

### Apéndice III

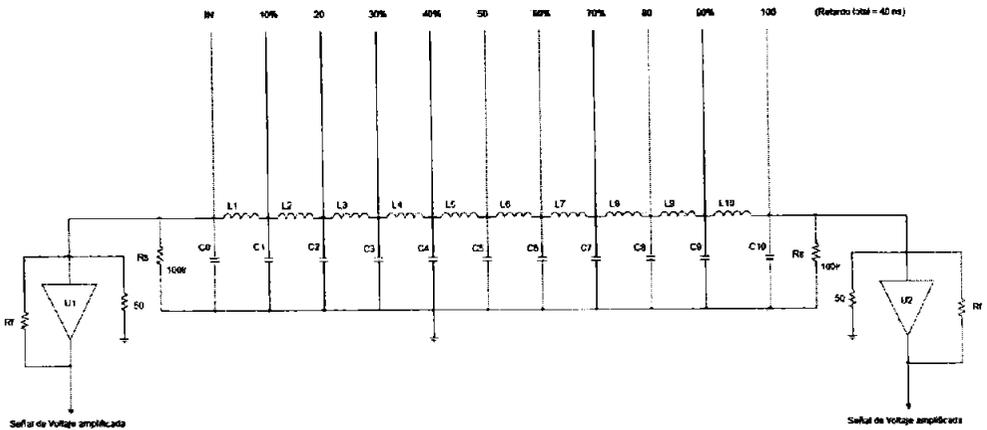
Diagrama del circuito electrónico instrumentado en el prototipo A



En el esquema pueden observarse los alambres ( $W$ ), que fueron conectados entre sí con *delay lines Rhombus* modelo *TYB98-5*, con un retraso por *tap* de 50 ns. Los 40 alambres de Tungsteno-Oro, separados entre sí por 2.54 mm, cubrían un área de detección de  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ , con un retardo temporal total de 2  $\mu\text{s}$ . En el diagrama aparecen los preamplificadores sensibles a la carga (*Ortec 142C*), que no formaban parte del circuito electrónico implementado en el ánodo del detector.

## Apéndice IV

*Diagrama electrónico del ánodo instrumentado en el prototipo B  
(tomado de la referencia [36])*

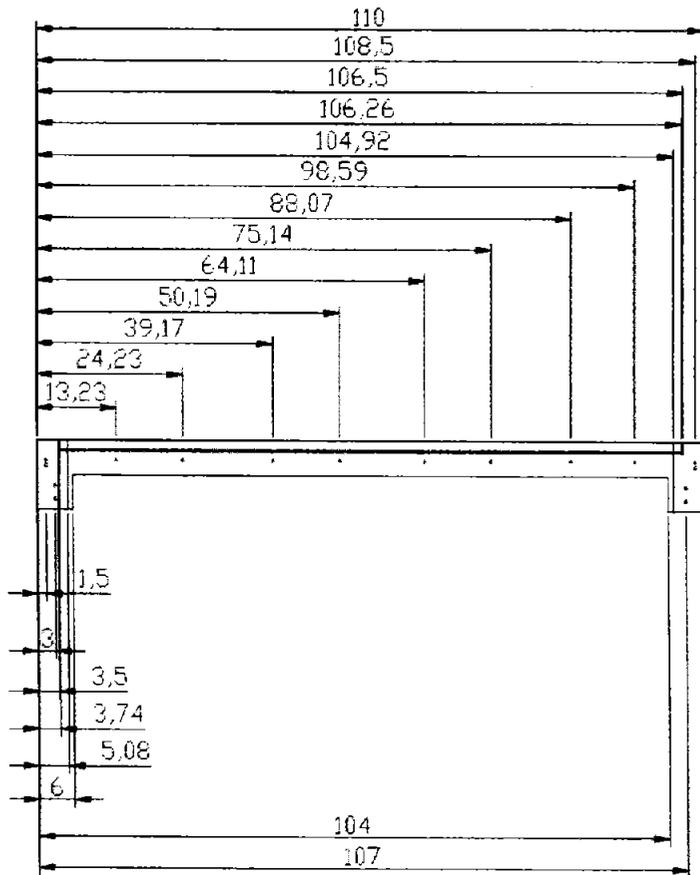


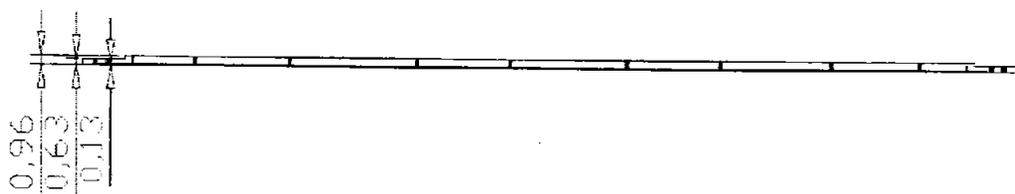
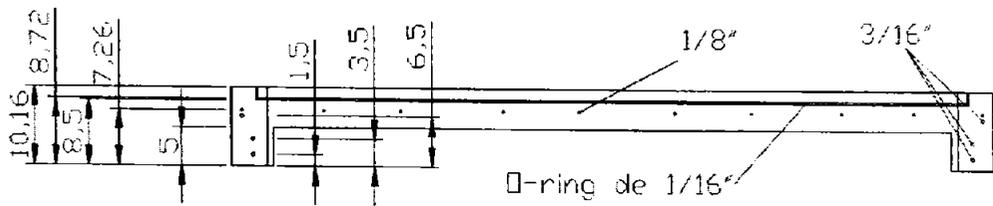
- El módulo de retardo (*delay line*) utilizado era el modelo *SIP5-405* de *Rhombus*.
- Las especificaciones mecánicas y los planos de las estructuras aparecen en la referencia correspondiente [36].

## Apéndice V

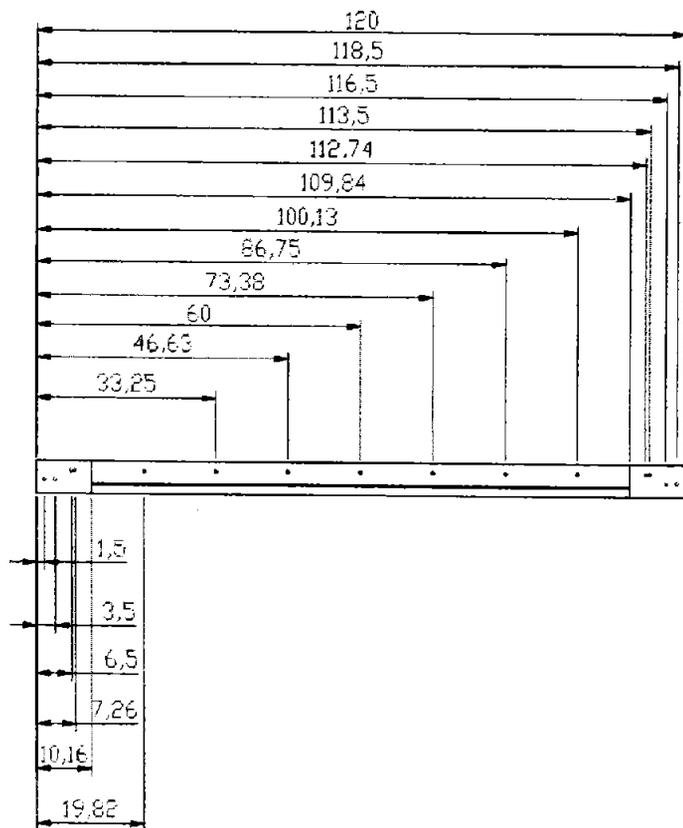
*Planos correspondientes a la estructura del ánodo  
(4 Piezas en total)*

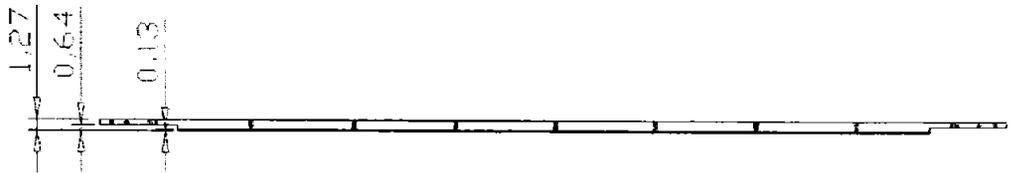
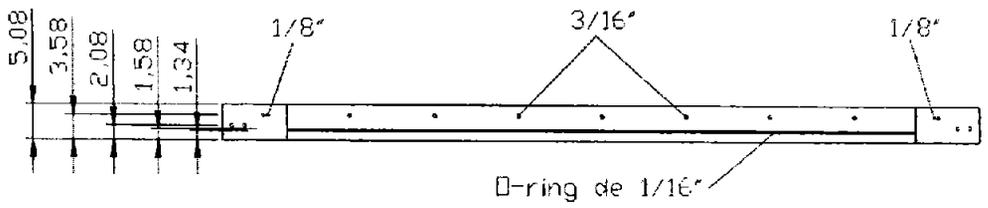
**2 Piezas en Aluminio T-5**  
*(Unidades: cm)*





**2 Piezas en Aluminio T-5**  
(Unidades: cm)

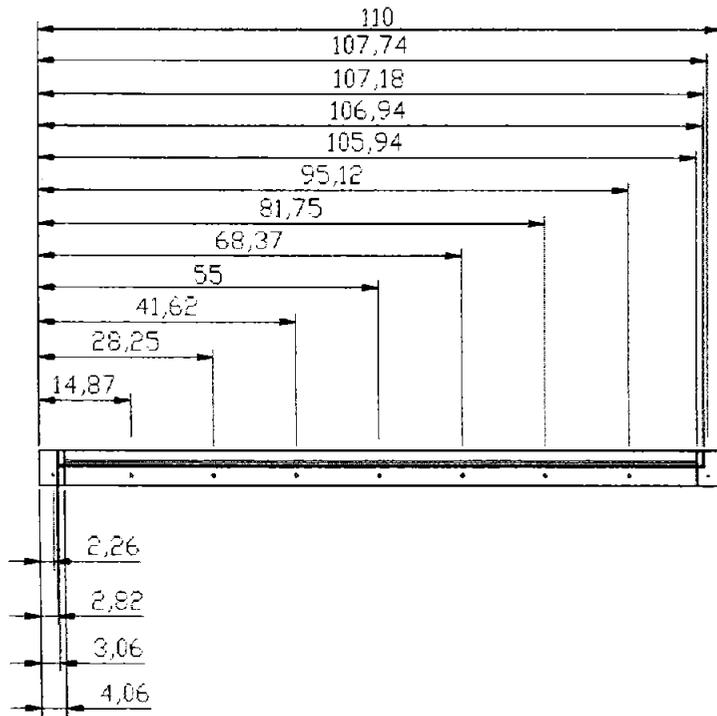


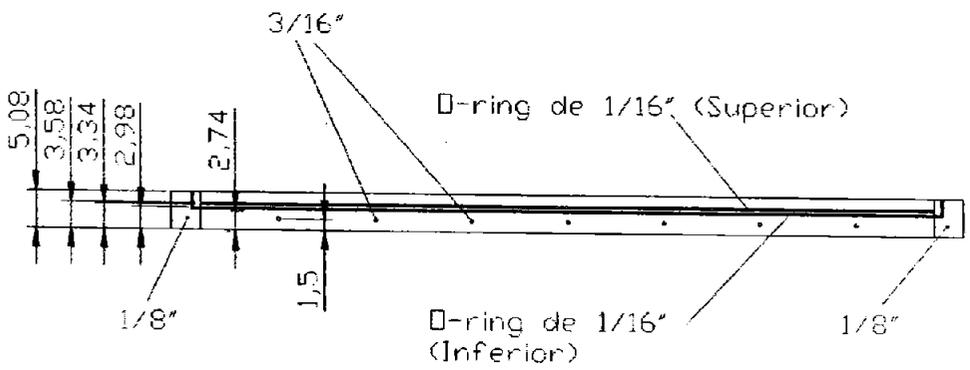


## Apéndice VI

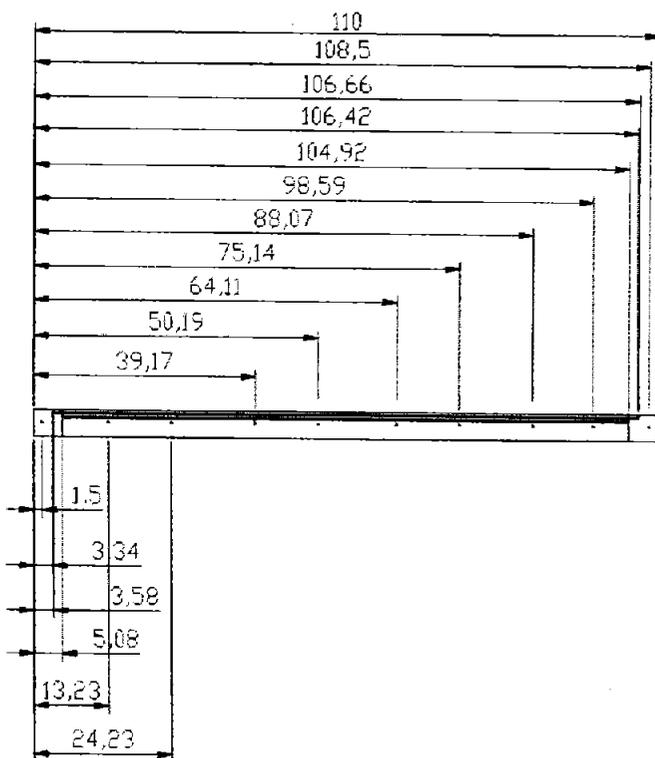
*Planos correspondientes al separador  
(4 Piezas en total)*

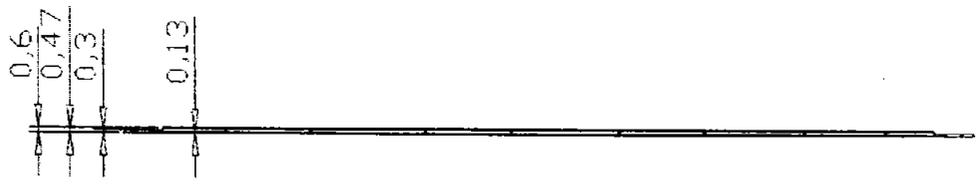
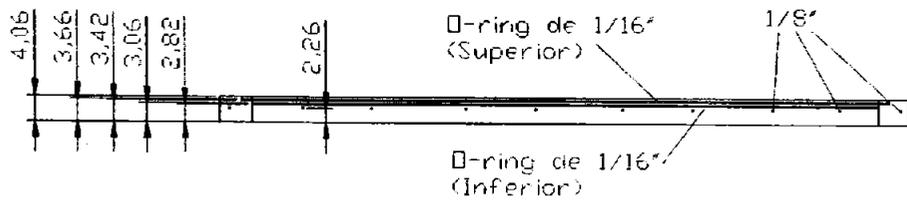
**2 Piezas en acrílico**  
*(Unidades: cm)*





**2 Piezas en acrílico**  
(Unidades: cm)



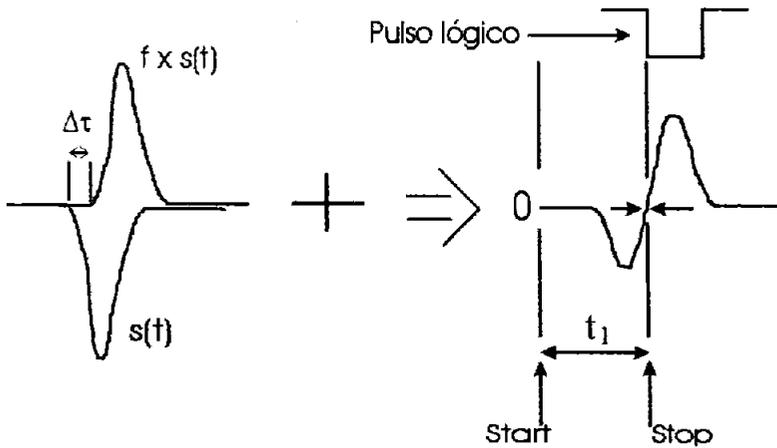


## Apéndice VII

### Discriminación por Fracción Constante

Los principios de la técnica de análisis temporal de señales que se describen a continuación son comúnmente utilizados por módulos electrónicos tipo NIM, destinados a discriminar pulsos por debajo de un umbral establecido, desechando así la mayoría de las veces información de origen espurio, para después generar pulsos lógicos (señales cuadradas  $\sim -1$  V) que determinan la ubicación temporal del evento analizado, que sobrepasó el umbral mencionado, respecto a un marco de referencia en tiempo.

La discriminación por fracción constante consiste básicamente en la suma de la señal original  $s(t)$  y una imagen  $f \cdot s(t)$  retrasada una cantidad fija  $\Delta t$ . La imagen es de distinta polaridad que la original y de menor amplitud, por lo que el término  $f$  es una fracción menor que la unidad. La señal así obtenida es analizada con un comparador de "cruce por cero", obteniendo una información de posición temporal precisa que elimina errores de fluctuación conocidos como *walk* inducidos por señales con *rise time* constante y amplitudes variables.



**Figura A7.1** Esquema correspondiente al principio de operación en un módulo de discriminación por fracción constante, donde la suma de una imagen y la localización del cruce por cero genera la ventana lógica con información temporal.

Para obtener la información temporal respecto a una fracción de la máxima amplitud de la señal estudiada, primero debe fijarse el valor que tendrá dicha fracción. Dicha condición establece que el máximo del pulso atenuado y retrasado tiene que cruzar al pulso original en la fracción seleccionada. Lo cual conduce a la siguiente relación [40]:

$$\delta t = t_s (1 - f) \quad . . . . . (A.1)$$

donde  $\delta t$  es el retraso temporal aplicado,  $t_s$  es el *rise time* de la señal analizada y  $f$  es el valor de la fracción constante. Por lo que el retraso temporal adecuado del módulo CFD (*Constant Fraction Discriminator*) a utilizar puede obtenerse si se conoce el *rise time* de los pulsos estudiados.

Los valores que pueden variarse generalmente en los módulos electrónicos de este tipo son  $\delta t$  y  $f$ . El retraso temporal en algunos modelos es de 2 a 10 ns, aunque en otros casos este valor es posible incrementarlo considerablemente al colocar un cable tipo *lemo* conectado al mismo con la longitud proporcional al retardo requerido ( $\sim 5$  ns/m). Mientras que para  $f$  los valores fluctúan entre 0.2 y 0.4, y por lo regular no es posible alterar de manera precisa dicha característica establecida por el fabricante.

## Apéndice VIII

### *Lenguaje LabVIEW*

Éste es un lenguaje de programación gráfica (Lenguaje G), diseñado para aplicaciones en instrumentación, automatización, adquisición de datos y control de procesos.

La programación G es el corazón de Labview, y difiere de otros lenguajes de programación como C o Fortran, en que éstos están basados en texto, mientras que G es una programación gráfica. Los programas en G o VI's (*Virtual Instruments*) constan de una interfaz interactiva de usuario y un diagrama de flujo de datos que hace las funciones de código fuente. De forma más específica, la programación gráfica Labview se estructura como sigue:

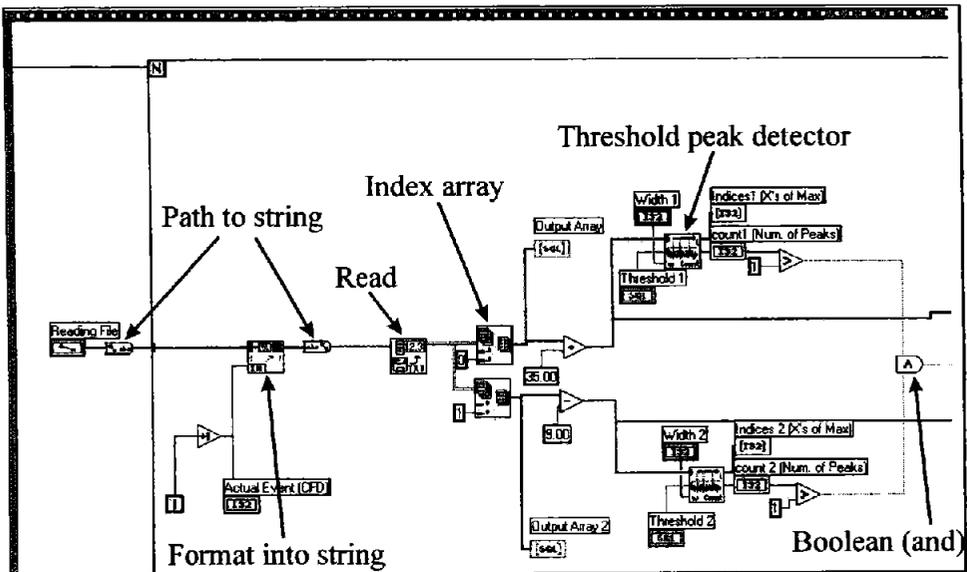
- a) La interfaz interactiva de usuario de un VI se llama Panel Frontal, debido a que simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores.
- b) El VI recibe instrucciones de un diagrama de bloques que construimos en G. El diagrama de bloques es la solución gráfica a un determinado problema de programación. Además, el diagrama de bloques es el código fuente de nuestro programa o VI.
- c) Los VI's son jerárquicos y modulares. Pueden utilizarse como programas de alto nivel o como subprogramas de otros programas. Cuando un VI se usa dentro de otro VI, se denominan subVI. El ícono y los conectores de un VI funcionan como una lista de parámetros gráficos de forma que otros VI's puedan pasar datos a un determinado subVI.

Este lenguaje cuenta, entre otras muchas herramientas, con subrutinas de lectura y procesamiento de señales analógicas y digitales dentro de ambientes compatibles con formatos ampliamente utilizados en ramas tan diversas como la Automatización industrial, Telemetría, Monitoreo y Control, Telecomunicaciones, Robótica, Meteorología y Procesamiento de imágenes. El citado ambiente facilita la creación de instrumentos virtuales que ayudan a cuantificar las principales características de los pulsos estudiados permitiendo realizar estudios precisos sobre las magnitudes involucradas [44].

## Apéndice IX

### Análisis de datos con LabVIEW

A continuación se presenta el diagrama de bloques o código fuente, de las distintas subrutinas utilizadas para el análisis de datos y emulación de procesos asociados a un discriminador por fracción constante programado con el lenguaje LabVIEW. Así mismo, se detallan los elementos involucrados en cada etapa.



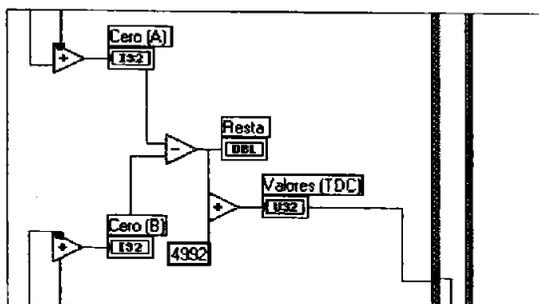
#### 1era. Etapa

El programa fue escrito en una sola secuencia (*frame*), dentro de la cual fueron incluidas las subrutinas destinadas a analizar las señales involucradas, y donde el algoritmo de análisis se ejecutaba para cada pareja de datos (*for loop*). Los archivos correspondientes a los pulsos guardados tenían una numeración consecutiva (*Format into string*), la cual era leída (*Read from spreadsheet file*) en formato numérico (*Path to string*).

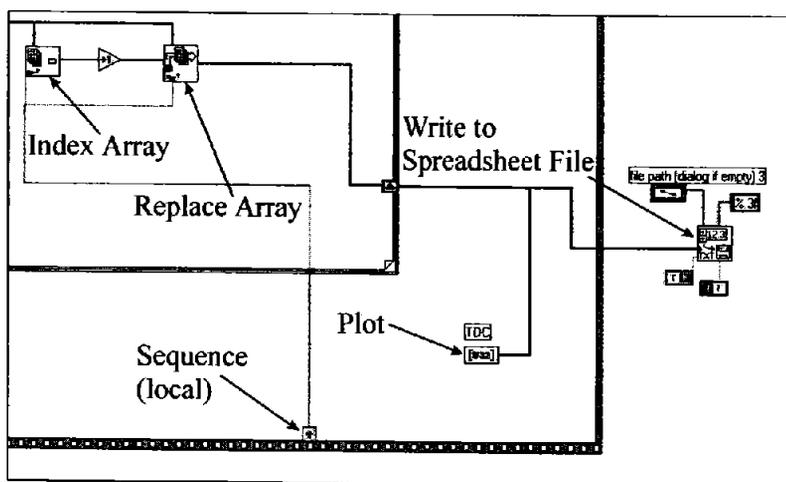
Una vez seleccionado el archivo, se tomaba la columna correspondiente a cada pulso con un selector de arreglos (*Index array*), para después nivelar la línea de tierra de cada evento sumando o restando cierta cantidad, con la intención de situar a todas las señales sobre la misma línea de referencia, evitando así pedestales que alteraran la magnitud de las mismas. A la



En la siguiente etapa (3era.) se incluían para su adición (+) la posición de cruce por cero local y la correspondiente al valle, teniendo así la ubicación en canales del “cruce por cero absoluto” asociado al pulso, teniendo así su marca temporal absoluta expresada en número de canales. Después, ambas señales (izquierda y derecha) eran restadas entre sí (-) para luego sumarles una constante (4992) con el fin de obtener siempre cantidades positivas. De esta forma teníamos los valores asociados a las posiciones temporales de cada evento (Valores TDC).



3era. Etapa



4ta. Etapa

Finalmente (4ta. etapa), el valor obtenido de cada evento se llevaba a la siguiente secuencia (*frame*) para construir el histograma necesario para el

espectro de posición. Para ello, se incrementaba en un valor (+1) el índice del dato asociado (*Index Array*), teniendo así un arreglo de una dimensión con 9984 “canales” (*Replace Array*). De ahí la información era desplegada gráficamente (*Plot*), para después almacenarla como columna de datos en un archivo tipo ASCII (*Write to Spreadsheet File*).



## Bibliografía

- [1] L.W. Álvarez, *et al.*, "Search for hidden chambers in the pyramids", *Science*, **167** (1970) 832-839.
- [2] R. Alfaro, *et al.*, "A muon detector to be installed at the Pyramid of the Sun", *Rev. Mex. Fis.*, **49** (2003) 54-59.
- [3] H. Tanaka, *et al.*, "Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano", *Nucl. Instr. Meth. A* **507** (2003) 657-669.
- [4] K.N. Borozdin, *et al.*, "Radiographic imaging with cosmic-ray muons", *Nature*, **422** (2003) 277.
- [5] F. Sauli, *Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers*, CERN, Yellow report 77-09, France (1977).
- [6] R. Alfaro-Molina, *Sistema multialámbrico de detección para estudios de dispersión elástica*, Tesis de Doctorado en Física (Posgrado en Ciencias Físicas), Facultad de Ciencias, UNAM, México, 2000.
- [7] J.A. Otaola y J.F. Valdez-Galicia, *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*, Colección La Ciencia desde México / 108, Fondo de Cultura Económica, México, 1992.
- [8] P.K.F. Grieder, *Cosmic Rays at Earth*, Elsevier Science, Amsterdam, 2001.
- [9] J. Flores-Valdés, *La gran ilusión II: Los cuarks*, Colección La Ciencia desde México / 22, Fondo de Cultura Económica, México, 1995.
- [10] T.K. Gaisser, T. Stanev, "Cosmic rays review of particle physics", *Eur. Phys. J. C*, **3** (1988) 132-137.
- [11] K. Hagiwara, *et al.*, Particle Data Group, *Phys. Rev. D* **66**, Part I, (2002) 10001.

- [12] J. Rickards-Campbell y R. Camaras-Ross, *Las radiaciones II: El manejo de las radiaciones nucleares*, Colección La ciencia para todos, Fondo de Cultura Económica, México, 1999.
- [13] R. Ponce-Juárez, *Medida de la distribución angular de muones atmosféricos en la Ciudad de México*, Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 2004.
- [14] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurements*, Wiley, New York, 1989.
- [15] J.M. López-Robles, *Estudio de la respuesta de BGO y CsI(Tl) a electrones de baja energía*, Tesis de Maestría en Física (Posgrado en Ciencias Físicas), Instituto de Física, UNAM, México, 2001.
- [16] J.M. López-Robles, *Estudio sobre un detector de centelleo sensible a la posición*, Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1998.
- [17] J.B.A. England, *Techniques in Nuclear Structure Physics*, Macmillan, London, 1974.
- [18] J.B. Birks, *Scintillation Counters*, Mc. Graw-Hill, New York, 1963.
- [19] J.K. Walker, "Characteristics of plastic scintillators in their use as large area particle detectors", *Nucl. Instr. Meth.*, **68** (1969) 131-134.
- [20] Hamamatsu Photonics K.K., *Catalog of Photomultiplier Tubes*, U.S.A., 1999.
- [21] G. Charpak, *et. al.*, "The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles", *Nucl. Instr. Meth.*, **62** (1968) 262-268.
- [22] D. Ritson, *Techniques of high-energy physics*, Interscience, New York, 1961.
- [23] L.D. Landau y E.M. Lifshitz, *Quantum Mechanics*, Pergamon Press, Oxford, 1977.

- [24] E.J. Kobetich *et. al.*, “Energy deposition by electron beams and  $\delta$  rays”, *Phys. Rev.* **170** (1968) 391-396.
- [25] H. Stelzer, “A large area parallel plate avalanche counter”, *Nucl. Instr. Meth. A*, **133** (1976) 409-413.
- [26] P. Morse y H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics*, Mc. Graw-Hill, New York, 1954.
- [27] G.A. Erskine, “Electrostatic problems in multiwire proportional chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **105** (1972) 565-572.
- [28] A. Breskin, *et. al.*, “Recent observations and measurements with high accuracy drift chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **124** (1975) 189-214.
- [29] F. Binon, *et. al.*, “Low pressure multiwire proportional chambers with high time resolution for strongly ionizing particles”, *Nucl. Instr. Meth.*, **94** (1971) 27-28.
- [30] R. Grove, *et. al.*, “Electromagnetic delay line readout for proportional wire chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **89** (1970) 257-262.
- [31] G. Charpak, *et. al.*, “Some read-out systems for proportional multiwire chambers”, *Nucl. Instr. Meth.*, **65** (1968) 217-220.
- [32] Eljen Technology, *Technical Report*, USA, 1999.
- [33] R. Alfaro-Molina, *et. al.*, “An inexpensive PSD for heavy-ion elastic scattering measurements”, *Nucl. Instr. Meth. A*, **392** (1997) 447-449.
- [34] C. Mazur, *et al.*, “Position sensitive multiwire proportional parallel plate detector for heavy ions”, *Nucl. Instr. Meth.*, **212** (1983) 203-208.
- [35] L.G. Christophorou, *et. al.*, “Gases of possible interest to SSC muon detectors”, *Nucl. Instr. Meth. A*, **309** (1991) 160-168.
- [36] E. Vázquez-García, *Detector multialámbrico para muones de alta energía*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica Electrónica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2004.

- [37] M. Dialinas, *Technologie des chambres a fils*, Reporte Interno, Laboratorio del Acelerador Lineal, Universidad de París, Francia, 1991.
- [38] D2L, *Preamplifier for position sensitive detectors V 1.4*, Hoja de especificaciones técnicas, Francia, 2004.
- [39] National Instruments, *LabVIEW User Manual*, USA, 2001.
- [40] C.A.E.N., *Dual Constant Fraction Discriminator N253*, User's Manual, Italia, 1996.
- [41] H. Kano *et al.*, "An MWPC readout chip for high rate environment", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **48** (2001) 509-513.
- [42] J. Toledo *et al.*, "Fast and compact data acquisition for gas-filled detectors with delay line", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **51** (2004) 1488-1491.
- [43] D.A. Gedcke, W.J. McDonald, "Design of the constant fraction of the pulse height trigger for optimum time resolution", *Nucl. Instr. Meth.*, **58** (1968) 253-260.
- [44] A.M. Lázaro, *LabVIEW 6.1 Programación gráfica para el control de instrumentación*, Paraninfo, España, 2001.