



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"DETECTOR MULTIALÁMBRICO PARA
MUONES DE ALTA ENERGÍA"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
P R E S E N T A :
VÁZQUEZ GARCÍA EDGAR

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ARTURO MENCHACA ROCHA



MÉXICO, D. F.

2004



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.

Finalmente, concluyo una etapa más de mi vida que tras años de estudios me han dejado muy gratos recuerdos y sobre todo, grandes amigos. No puedo estar más que agradecido con las personas que me han acompañado en este largo caminar y que de alguna manera han dejado huella en mi persona.

Sin embargo no puedo dejar de agradecer a las personas que contribuyeron enormemente para la consecución de este trabajo. Ellas son:

DIOS: Gracias por permitirme disfrutar de tu obra. Después de reencontrarte todo ha sido más fácil. Gracias.

MAMÁ: Tarde, ¡pero seguro! Gracias por tu inmenso e incondicional amor. Siempre te llevaré conmigo. Gracias por enseñarme que la vida no es fácil, pero que con trabajo y constancia se puede mejorar el camino. Te amo.

MARIS: Por poco me ganas, ¡uff! A mi cómplice y mi hermana alcahueta que le puedo decir mas que mil gracias por tantos momentos felices. Sabes que siempre estaré para apoyarte así como tú lo has hecho conmigo todos estos años. Te quiero mucho.

AZALIA: Chaparrita, mil gracias por acompañarme a lo largo de mi carrera. Fuiste constante en tu amor, cariño y paciencia hacia mí aún en los momentos más difíciles. Me alegro que estés a mi lado para disfrutar este triunfo tan anhelado por los dos. Te amo.

ABUE: Aunque las cosas no siempre son como uno las planea, en ocasiones nos empeñamos por cambiarlas a nuestro modo. Gracias por esos genes de terquedad e inventiva. Esta va por ti.

DR. MENCHACA: Gracias por la paciencia y el tiempo dedicado para elaborar esta tesis. Sobre todo, gracias por la confianza depositada en mí. Espero no haberlo defraudado.

MANOLO: No tengo palabras para agradecerte tu ayuda incondicional. Sin ella, no hubiera sido posible el que este trabajo viera la luz. Gracias por esas horas de explicaciones interminables. Te deseo mucha suerte.

DON MARIO: Voy a extrañar el buen humor y el ambiente que armábamos en el taller, sobre todo, los viernes de tks.

RUBÉN: Gracias por la paciencia y el tiempo dedicado.

A MIS SINODALES: Les estoy muy agradecido por interesarse en el tema y apoyarme para lograr de éste, un buen trabajo. En especial, agradezco al Ing. Martín por asesorarme desde el inicio, dedicándome gran parte de su tiempo. Guardo un muy buen recuerdo de cada uno de ustedes como profesores y como sinodales. Gracias.

Carlitos, Ganso, Juanito, gracias hermanos por su amistad durante tantos años, ¡salud! Vic, Esteban, carnales, gracias por su amistad y por los buenos recuerdos que me dejan de la fac. Blanca, Maga, amigochas gracias por su apoyo. Ana, tengo tanto que agradecerte, me ayudaste a encontrar el camino, gracias. Linda, realmente me hiciste reír cuando más lo necesitaba, mil gracias. Electropuercos un saludo. A todos los que consciente o inconscientemente me enseñaron algo, mil gracias.

Muchas cosas se juzgan imposibles de hacer, antes de que estén hechas.

—Plinio

La dificultad atrae al hombre de carácter, porque es en la adversidad que el verdadero hombre se conoce a sí mismo.

—Charles de Gaulle

ÍNDICE

Introducción.....	IV
1. Rayos Cósmicos	1
1.1 ¿Qué son los rayos cósmicos?	1
1.2 ¿Cómo se detectan los rayos cósmicos?.....	5
1.3 Tipos de detectores	8
1.4 ¿Por qué cámaras multialámbricas?	11
2. Detectores gaseosos.....	12
2.1 Principio de funcionamiento.....	12
2.2 Cámaras multialámbricas	16
2.3 Métodos de lectura electrónica	18
3. Diseño del detector.....	22
3.1 Introducción.....	22
3.2 Requerimientos y especificaciones de diseño.....	24
3.3 Dimensiones	26
3.4 Líneas de retraso (Delay lines)	27
3.5 Alambre	30
3.6 Gas.....	31
4. Construcción.....	35
4.1 Selección de materia prima.....	35
4.2 Selección de herramienta.....	42
4.3 Elaboración del contenedor	44
4.4 Elaboración del circuito impreso.....	45
4.5 Armado de la cámara.....	49

5. Mediciones y pruebas	57
5.1 Descripción de la instrumentación electrónica.....	57
5.2 Conexiones	71
5.3 Acondicionamiento del detector.....	73
5.4 Calibración del detector.....	75
5.5 Descripción de los pulsos	81
5.6 Obtención de resultados	84
5.7 Optimización	85
5.8 Linealidad y Resolución espacial	91
5.9 Caracterización de las cámaras.....	94
6. Conclusiones y futuro.....	99
Apéndice 1 (hojas de especificaciones).....	103
Apéndice 2 (planos del detector).....	122
Apéndice 3 (Manual).....	130
Bibliografía.....	141

INTRODUCCIÓN.

Desde sus orígenes, la humanidad en su afán por dejar huella de su existencia, ha elaborado distintas obras mediante las cuales pretende ser recordado e incluso admirado por las siguientes generaciones. Algunas más imponentes que otras, pero con un mismo objetivo: trascender. En estas manifestaciones los autores pretenden mostrar el nivel de desarrollo o perfección alcanzado por su civilización y así demostrar lo poderosos o influyentes que llegaron a ser. Las primeras pinturas rupestres con una antigüedad de entre 15 mil y 17 mil años¹ como las que se localizan en la cueva de Lascaux (Francia), en donde se representaron figuras de hombres y animales, fueron quizás el origen de esta costumbre que desde entonces y hasta nuestros días ha persistido.

El refinamiento de nuestra civilización y los avances científicos y tecnológicos alcanzados hasta nuestros días, marcaron la pauta para cuestionar las causas de la decadencia de civilizaciones anteriores a las nuestras que, siendo en su momento tan imponentes, no lograron sobrevivir al paso del tiempo. Preocupados por no correr la misma suerte, es que nacieron ciencias como la antropología y la arqueología que pretenden explicar el por qué de su extinción, y para ello es importante conocer cuáles eran sus costumbres, recursos, organización e ideología entre otras cosas. Son los vestigios y las obras dejadas por las civilizaciones las únicas pistas que se tienen para obtener estas respuestas.

En México encontramos varias manifestaciones de este tipo que van desde las pinturas rupestres, como en el caso de las encontradas en el año 2001 en la Sierra de Guadalupe en Baja California Sur, en donde los techos de las cuevas fueron transformados en murales colosales donde fueron plasmadas figuras humanas y algunos animales, con una antigüedad de por lo menos 7500 años. Miles de años más tarde y al paso de las distintas civilizaciones por lo que hoy en día constituye nuestro país, encontramos que el grado de complejidad se fue incrementando, dejándonos ver monumentos arquitectónicos impresionantes como el Tajín en Veracruz, Palenque en Chiapas, Chichén Itzá y Uxmal en Yucatán, son quizás los que sobresalen además de por su majestuosidad, por el estado de conservación en el que se encuentran. No por no mencionar otras culturas que también dejaron su legado merecen menos atención, sin embargo, de entre ellas nos ocuparemos de los Teotihuacanos.

La gran Teotihuacán ocupó entre los años 100 a. C. y 650 d. C., lo que actualmente forma la parte sur del Estado de México y está a 50 kilómetros del Distrito Federal. La ciudad vivió su máximo esplendor en los años 500 d. C. cuando tuvo una extensión de unos 20 kilómetros cuadrados con una población de entre 120 mil y 200 mil personas. Son muchas las incógnitas que existen en torno a esta cultura, el saber si dentro de la Pirámide del Sol existe una tumba como en Monte Albán, Chichén Itzá o en la pirámide de Keops en Egipto es una de ellas y aún más si tomamos en cuenta que la Pirámide del Sol es una de las más grandes de América. En lugares cercanos a Teotihuacán, se han encontrado entierros muy diferentes a los que en otras culturas se acostumbraban, en este caso, se hacen en fosas en donde se introduce el cadáver y se deja "sentado" junto con algunas de sus pertenencias a modo de ofrenda para luego ser cubierto con tierra. Por esta razón es importante encontrar,

¹ <http://www.culture.gouv.fr/culture/arcnat/lascaux/en/>

en caso de que existan, evidencias que ratifiquen estas formas de sepultar a los muertos. Estas evidencias seguramente serán despejadas al conocer el interior de la Pirámide del Sol. No menos importante es la forma de gobierno de los Teotihuacanos que, por los indicios que se tienen hasta ahora, estaba conformada por cuatro señores. En 1971 de manera accidental los arqueólogos Jorge Acosta y Doris Heyden encuentran la entrada a un túnel subterráneo (8 metros de profundidad) que inicia a los pies de la Pirámide del Sol y llega casi hasta el centro de la misma. Los arqueólogos encontraron saqueado lo que pudo ser un centro ceremonial, la cueva es una formación volcánica que termina en lo que parece una flor de trébol, con cuatro cámaras (ver figura 1). El hecho de que esta cueva cuente con cuatro cámaras aunado a los palacios encontrados en las cercanías de Teotihuacan, dieron la pauta a los arqueólogos para suponer una forma de gobierno en la que el poder se depositaba en cuatro señores. Quizás por la grandeza de la ciudad, era de suma importancia no depender de una sola persona para gobernar la ciudad por lo que se tenían cuatro señores, esto último aún es una hipótesis. No existe precedente de esta forma de gobierno en alguna otra cultura, sin embargo se sospecha, que uno o cuatro, los gobernantes de Teotihuacan deben estar enterrados dentro de la Pirámide del Sol.

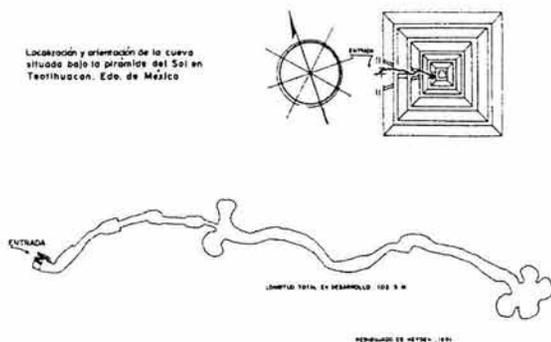


Figura 1. Arriba, Pirámide del Sol en su estado actual.
Abajo, localización del túnel y forma del mismo.

Los métodos de exploración empleados por los arqueólogos hasta ahora implican la destrucción de la zona de estudio (en este caso implica la perforación de la pirámide), por

lo que ha sido necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitan obtener los mismos resultados que se obtendrían con los métodos antiguos, pero sin dañar los monumentos.

Una técnica alternativa para explorar el interior de las pirámides se aplicó por primera y única ocasión en Egipto entre 1968 y 1969 por el premio Nóbel de Física Luis W. Álvarez y colaboradores en las pirámides de Giza[1]. Los resultados obtenidos con la nueva técnica corroboraron la no existencia de cámaras ocultas al interior de la pirámide de Kefrén, interrogante que se tenía dada la existencia de un grupo de 4 cámaras tanto en la pirámide de Keops (padre de Kefrén) como en la pirámide de Sneferu (su abuelo). Estas cámaras corresponden a la cámara del rey, la cámara de la reina, la galería y una cámara subterránea. Dado el antecedente de la arquitectura de estas dos pirámides, era de suponer la existencia de cámaras al interior de la pirámide de Kefrén.

La técnica implementada por Álvarez se basa en la detección de radiación cósmica que no hace necesario perforar la estructura de la pirámide para descartar las hipótesis. Éste método requiere que el detector sea colocado bajo el objeto de estudio. En la pirámide de Kefrén fue posible la implementación de la técnica debido a que con anterioridad un grupo de arqueólogos descubrieron un túnel a nivel del piso que llega al centro de la pirámide a una cámara mortuoria que se conoce como la cámara de Belzoni.

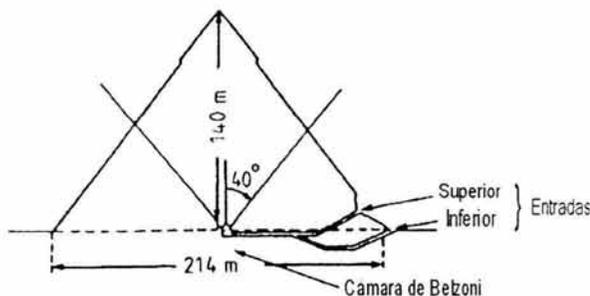


Figura ii. Corte transversal de la pirámide de Kefrén.

Al colocarse ahí el detector, el flujo de radiación cósmica a medir forzosamente atravesaría el cuerpo de la pirámide para llegar hasta él, por lo que de existir las cámaras, serían fácilmente identificables al realizar el análisis. El funcionamiento básico de esta técnica consiste en captar la radiación cósmica de alta energía proveniente del espacio exterior dentro de la pirámide, obteniendo así un espectro de incidencias. Al compararlo con otro espectro generado en una simulación (vía software) en la que se considera que la pirámide no tiene huecos en su interior(cámaras ocultas), se obtiene una diferencia en la cantidad de radiación incidente.

En el espectro de incidencias proveniente del sistema de detección, observaremos en un área más sombreada el área correspondiente a las regiones de la pirámide en que se tiene

una menor densidad de materia (una cavidad), y en un área clara (pocas incidencias) el área correspondiente a una capa de materia más densa. La interpretación de las diferencias de incidencias de radiación entre el espectro proveniente de la medición y la simulación, es la que permite afirmar la existencia o inexistencia de cámaras ocultas al interior de la pirámide. Por ejemplo, si del espectro proveniente del sistema de detección obtuviéramos un área notoriamente sombreada y al compararla con la misma zona del espectro obtenido de la simulación correspondiera a un área clara (pocas incidencias), seguramente estaríamos ante el descubrimiento de la cámara mortuoria en cuestión.

Retomando la idea de Álvarez y con el descubrimiento de la cueva que pasa por debajo de la Pirámide del Sol, un equipo de investigadores tienen la tarea de encontrar las cámaras mortuorias que se especula deben estar en su interior. El resultado de estas investigaciones seguramente será la clave para el esclarecimiento de las múltiples incógnitas que envuelven a Teotihuacan.

En un proyecto de esta naturaleza, los científicos necesitan la colaboración de la ingeniería para llevar a cabo su cometido. Del experimento de Álvarez a la fecha las innovaciones tecnológicas son apreciables, así pues, con las bases científicas de los investigadores se generan ideas y conceptos teóricos que gracias a la formación del ingeniero, éste es capaz de materializarlas dando origen a un instrumento funcional. La intervención de un Ingeniero Electrónico pues, es necesaria cuando la mayor parte de la tecnología que se emplea para el detector involucra elementos electrónicos, así como durante la toma de decisiones al diseñar el detector.

El sistema de detección que se empleará para la encontrar las posibles cámaras mortuorias al interior de la pirámide es complejo, por lo que en este trabajo nos limitaremos a la construcción de un detector prototipo de partículas subatómicas de alta energía sensible a la posición, que funcione correctamente en un laboratorio. Y es que dada la energía y velocidad con que esta radiación incide en nuestro planeta, atraviesa tanto edificios como una gran cantidad de materia (la pirámide completa). Por lo que es posible construir el detector y hacerlo funcionar adecuadamente en un laboratorio, con la certeza de que funcionará correctamente en el lugar en donde se quedará haciendo las mediciones.

En el primer capítulo de este trabajo se presenta una explicación de lo que son los rayos cósmicos, así como una breve reseña de cómo se llegó a su descubrimiento. En el segundo capítulo hacemos énfasis en lo que son los detectores gaseosos y el por qué de la elección de los detectores multialámbricos. En el tercer capítulo se hace referencia tanto a las especificaciones de diseño como a las limitaciones físicas que se tienen que considerar para la construcción del detector final. El proceso de construcción del detector, así como todas las consideraciones que se tienen que tomar en cuenta durante el proceso se mencionan en el capítulo 4. Los resultados obtenidos a partir de un detector prototipo que servirá de referencia para la construcción del detector final se describen en el capítulo cinco. Finalmente en el capítulo 6 con la experiencia adquirida en la construcción del detector prototipo se proponen las mejoras que deben incluirse en la construcción del detector de tamaño real para su adecuado funcionamiento.

Con la tecnología de que disponemos actualmente, junto con la experiencia de Álvarez y su grupo de colaboradores, la reconstrucción del experimento marca un hecho sin precedentes debido a la inexistencia de un detector de las dimensiones y características que tendrá el nuestro en América Latina, por lo que sentamos las bases del desarrollo de detectores de estas características. Por otra parte, además de la pirámide de Kefrén en Egipto, el método no se ha aplicado en alguna otra pirámide por lo que se tiene un incentivo adicional al considerar que será en una pirámide de nuestro país en donde se realizará el experimento. Invariablemente de los resultados obtenidos, quedarán sentadas las bases para la exploración de otros sitios arqueológicos del país en los que pueda ser aplicado el método.

1. Rayos Cósmicos

1.1 ¿Qué son los rayos cósmicos?

Los rayos cósmicos han estado presentes desde siempre en nuestro planeta por el simple hecho de formar parte del cosmos. A pesar de ello, no fue sino entre 1911 y 1912 cuando el físico Austriaco Victor Franz Hess los descubre y obtiene por ello en 1936 el premio Nóbel de Física.

Su descubrimiento, así como el de la parte del conocimiento científico, se ha dado de forma lenta y en la mayoría de las ocasiones de manera accidental. Podríamos decir que Tales de Mileto a principios del siglo VI a. C., se percató de la existencia de los rayos cósmicos cuando observó que después de frotar ámbar con materiales ligeros, éstos se atraían y pasado un tiempo la atracción desaparecía. La explicación que dio Tales en aquel tiempo fue que el ámbar poseía una *alma* que era la que atraía a dichos cuerpos, sin embargo, no explicó la razón por la que después de un tiempo, el ámbar *perdía el alma*.

En Francia a principios del siglo XVIII Charles-François de Cisternay Dufay descubre que el aire es capaz de conducir la electricidad cuando se encontraba cerca de un sólido caliente. Esta propiedad implicaba que el aire debía poseer partículas eléctricas libres capaces de desplazarse de un punto a otro haciendo que el aire se comportara como un elemento conductor. Para 1896 Joseph John Thomson y Ernest Rutherford encuentran que estas partículas libres eran iones¹ gaseosos y un año más tarde, W. Linss observó que un cuerpo cargado al ser expuesto al aire perdía la electricidad, la misma observación de Tales de Mileto. Para confirmar que este fenómeno ocurría en cualquier parte, el físico F. Exner planeó una red internacional de observatorios de electricidad atmosférica usando electroscopios² portátiles.

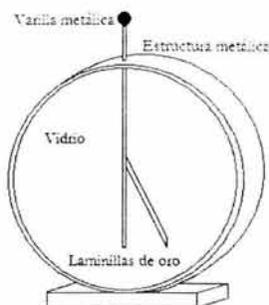


Figura 1. Electroscopio de láminas de oro. Las laminillas cuelgan de la varilla metálica que está aislada de la estructura. Cuando se acerca un cuerpo eléctricamente cargado a la varilla, las laminillas se cargan y se repelen, haciendo posible la determinación de la cantidad de carga del cuerpo al medir la separación de las laminillas.

¹ Ión: Átomo o grupo de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica.

² Instrumento utilizado para medir y detectar la carga eléctrica.

En 1900 Charles Thomson Rees Wilson en Inglaterra al realizar un estudio minucioso con los electroscopios descubre la existencia de una radiación capaz de regenerar los iones al interior del electroscopio 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 Wilhelm Conrad Roentgen en 1895 y un año más tarde la radiactividad por Henri 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 electroscopios 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 cubierta 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 electroscopios 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 destinaria 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 [2].

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 masivas³, e incluso algunas teorías refieren su origen al inicio mismo del cosmos [3].

³ Estrellas supernovas: explosión de una estrella en la que se libera una gran cantidad de energía. Una supernova libera en 10 segundos 100 veces más energía de la que libera nuestro Sol en toda su vida.

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^4 . 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 kg/m^2 de materia antes de llegar a la Tierra, en un tiempo que varía de 1 a 100 millones de años [4].

Para su estudio, la radiación cósmica se ha dividido en primaria y secundaria. Radiación primaria es aquella que está compuesta por todas las partículas que han sido aceleradas en fuentes astrofísicas. Los rayos cósmicos secundarios son el producto de la interacción de protones con gases interestelares, como nuestra atmósfera. Cuando los rayos cósmicos primarios llegan a nuestro planeta, el choque de estos núcleos con los elementos 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 antipartículas⁵ [5]. La vida media⁶ 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 superior al resto de las partículas generadas, siendo posible que lleguen a la superficie terrestre antes de decaer⁷.

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.

El resultado del choque de protones con la materia atmosférica da origen a la radiación cósmica secundaria. 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. Al momento de la creación de estas nuevas

Pulsares: Estrella de neutrones que resulta de la explosión de una supernova, se caracteriza por la emisión de radiación muy intensa a intervalos regulares y cortos.

⁴ eV: electron-volt. Un electron-volt se define como la energía que adquiere una partícula al ser sometida a una diferencia de potencial de un volt. En física nuclear es muy común utilizar la notación de eV. Un GeV equivale a 1×10^9 eV, un keV son 1×10^3 eV.

⁵ Todas aquellas partículas que se diferencian de su partícula por la carga eléctrica. El resto de sus propiedades son idénticas.

⁶ Es el tiempo en que la mitad de partículas de una muestra ha decaído. El decaimiento de las partículas sigue un patrón estadístico, por lo que no necesariamente las partículas decaen después de un determinado tiempo.

⁷ Creación de un nuevo tipo de partículas a partir de otra que ha perdido energía.

partículas, se da de manera inmediata una nueva interacción de estas partículas con la materia atmosférica y con ellas mismas, creando una especie de lluvia cósmica. Como se mencionó, no todas las partículas de la radiación secundaria llegan al nivel del mar, porque se eliminan entre ellas al interactuar con sus antipartículas, cuando lo hacen con otras partículas o simplemente porque su tiempo de vida media no es lo suficientemente grande para que lleguen a la superficie.

Los muones.

La radiación primaria queda en la atmósfera en su totalidad y de la radiación secundaria son los muones los que llegan a la superficie terrestre con energías de varios GeV, en algunos casos sólo logran atravesarla unos cuantos kilómetros. En este trabajo llamaremos de forma indistinta a los muones como rayos cósmicos.

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 $1/9$ de la del protón. Por tener masa intermedia entre el electrón y el neutrón 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 [2].

Con el vertiginoso desarrollo de la tecnología y la base de conocimiento 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 $105.6583568 \pm 0.0000052$ MeV⁸, tomando como referencia que la masa en reposo del electrón es de 0.51099906 ± 0.0000015 MeV. Su tiempo de vida media es de 2.19703 ± 0.00004 micro-segundos [6]. Viaja a una velocidad cercana a la de la luz, las energías con que llega 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 mar⁹. 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

⁸ Cuando se trata de partículas elementales es común expresar las unidades de masa en [eV/c²], por ser más fáciles de manejar. Por costumbre se ha dejado de lado la división por c², por lo que es común observar expresada la masa en unidades de [eV], sin embargo debe considerarse para la conversión a unidades de [kg]. La ecuación $E=mc^2$ sustenta el empleo de estas unidades.

⁹ La incidencia de muones en este punto es de 1 cuenta por centímetro cuadrado por minuto para detectores horizontales [5].

muón surge un electrón y una pareja de neutrinos. Son las partículas más abundantes a nivel del mar.

1.2 ¿Cómo se detectan los rayos cósmicos?

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 cambios en alguna de sus propiedades, ya que esta radiación no es detectada por nuestros sentidos [7].

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 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 a 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 período en el que aparecen mayor número de manchas, la incidencia de muones en la Tierra es menor y viceversa (ver figura 2). Aún no se ha dado una explicación a este fenómeno, pero se ha monitoreado desde 1955 encontrando a lo largo de los años, que la variación no excede el 20% .

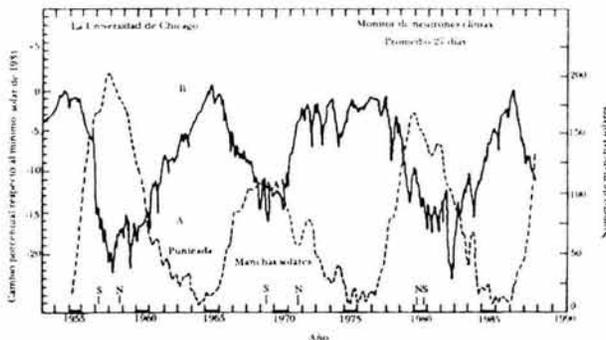


Figura 2. Ciclo Solar monitoreado desde 1955. Se observa en la línea punteada la aparición de las manchas solares. La línea continua indica la incidencia de radiación. Observamos que la variación no sobrepasa el 20%.

El viento solar también desvía la radiación cósmica, pues se descubrió que es capaz de llegar a grandes distancias más allá de nuestro planeta arrastrando en su camino con las partículas que se le interponen. 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. Estas variaciones de incidencia se observan en las figuras 3 y 4.

El efecto 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.

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.

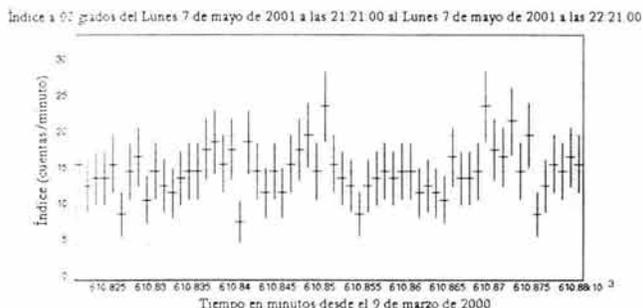


Figura 3. Variaciones en la incidencia muones observadas en un intervalo de tiempo de una hora. La posición del detector es perpendicular a la vertical (90 grados).

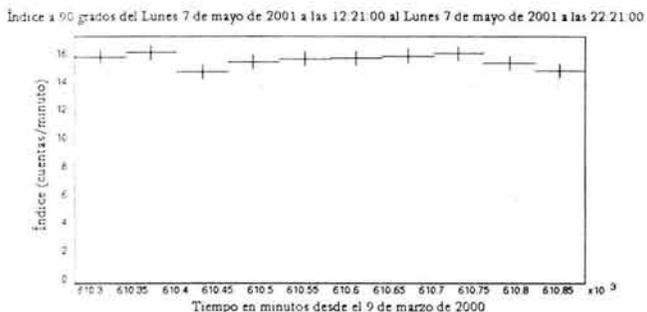


Figura 4. Variaciones que se presentaron en un intervalo de diez horas.

Cabe mencionar que la dirección en que inciden tanto los muones como el resto de radiación cósmica a nuestro planeta es aleatoria, sin embargo, es más frecuente la incidencia perpendicular a la superficie terrestre que la incidencia de radiación a otros ángulos. La diferencia en la cantidad de partículas contabilizadas con respecto a un detector que se coloca perpendicular a la vertical del piso (90 grados), es notable con respecto a un detector que tiene una inclinación respecto al piso. Lo anterior se aclara al observar la figura 5. El número de cuentas que se obtienen cuando el detector se coloca a 45 grados es significativamente menor respecto a cuando la posición es a 90 grados.

A su vez el conteo realizado con un detector posicionado verticalmente, es casi nulo, no queriendo decir con esto que no exista un conteo. Por la misma naturaleza de la radiación cósmica, es posible tener conteos con detectores colocados con cualquier ángulo, sólo que el conteo será mayor mientras más paralelo a la superficie sea colocado. La frecuencia de partículas que inciden perpendicularmente a la superficie es muy pobre.

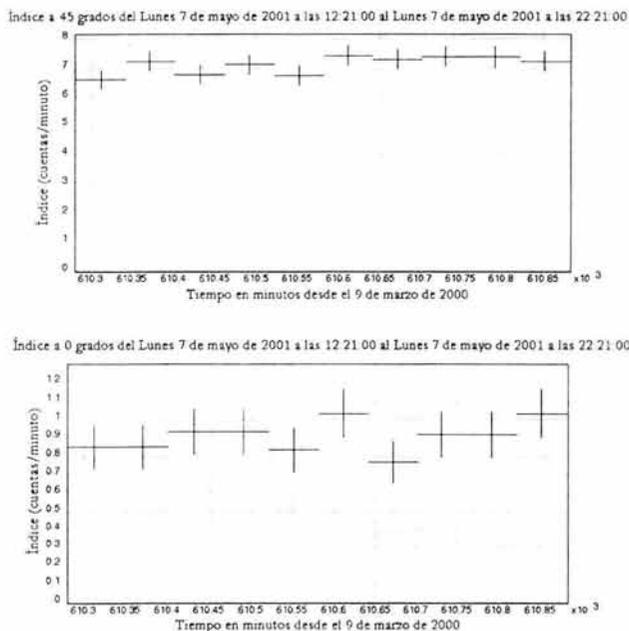


Figura 5. Cuentas por minuto obtenidas a 45 y 0 grados respectivamente, tomando como referencia la vertical.

1.3 Tipos de detectores.

La radiación afecta al medio en que se encuentra, cediéndole parte de su energía. Este intercambio de energía se traduce generalmente en ionizaciones y excitación de sus átomos, también ocurren cambios de temperatura, cambios químicos y emisión de luz.

Dependiendo del tipo de partículas que queramos captar hacemos la elección de los materiales que conformarán el detector diseñado, por lo que sería erróneo pensar en la existencia de un detector universal. Por ejemplo, para un cierto tipo de radiación de energía conocida, hay que considerar la cantidad de materia que la partícula tendrá que atravesar a su paso por del detector, para que las pérdidas de energía no afecten la detección. Si se pretendiera utilizar este mismo detector para otras partículas de menor energía, ocurriría que antes de terminar de atravesar el detector, la partícula perdería toda su energía o decaería en otra distinta a la que buscamos.

A continuación se describen los detectores que más importancia han tenido a lo largo de la historia en la detección de los rayos cósmicos, así como los que actualmente se utilizan en los centros de investigación.

Cámara de niebla.

Los primeros detectores en usarse fueron las cámaras de niebla que surgen a principios del siglo XX y son de gran utilidad para los investigadores que en esos años buscaban respuestas sobre los rayos cósmicos. La cámara de niebla es inventada por Charles Thomson Rees Wilson y su principio de operación utiliza la propiedad de ionización de los rayos cósmicos. Al interior de un tubo de cristal se introducía gas de fácil ionización, a presiones elevadas y una vez con el tubo sellado se esperaba a que ocurriera el fenómeno. Cuando una partícula proveniente de la radiación cósmica pasaba por el tubo, a su paso ionizaba las moléculas del gas con lo que se produce una condensación del gas, siendo posible observar diminutas gotitas, que describían la trayectoria por la que había pasado la partícula. Su nombre se debe a la forma en que se veía el gas al interior del tubo.

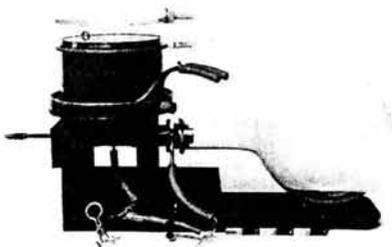


Figura 6. Cámara de niebla.

Gracias a la cámara de niebla, Dimitri Skobeltzin observa por primera vez la traza de los rayos cósmicos, con lo que se establece la primera base sólida que ratifica los resultados experimentales que presumían la trayectoria de la radiación cósmica.

El uso de la cámara de niebla hizo posible que se descubrieran nuevas propiedades de la radiación, pero más importante aún, es que gracias a que científicos como Carl Anderson que supieron interpretar tan bien los resultados observados en la cámara de niebla, idearon formas de alterar la trayectoria de las partículas y así determinar nuevas propiedades de esta radiación [8]. Pero lo mejor fue que también encontraron comportamientos que no correspondían a las partículas hasta entonces conocidas, por lo que en ese momento se había descubierto un nuevo tipo de radiación.

Para 1940 surgen detectores más sofisticados que aprovechan la ionización provocada por la radiación cósmica, como principio de operación. Estos detectores son: *las cámaras de ionización, contadores proporcionales, cámaras multilámbricas* y los *contadores Geiger-Müller*, su principal característica es que emplean un gas (puro o mezcla) que se caracterice por ser fácilmente ionizable. Por esta razón es que se les conoce también como detectores gaseosos. Las regiones de voltaje en que trabajan determinan su comportamiento [7], y por tanto, la aplicación a la que se destinan. Estos conceptos se explican más adelante.

Detectores de centelleo.

El descubrimiento de efectos de fotoluminiscencia en materiales orgánicos da origen a los detectores de centelleo. Dada la facilidad con que pueden moldearse y fabricarse, además de no ser tan costosos en comparación con otros detectores, los plásticos centelleadores se convirtieron en la opción más viable para la detección de partículas. Comercialmente se puede encontrar una amplia gama de modelos que incluyen aplicaciones específicas, como la discriminación por forma de pulso o centelleadores especiales para tiempos rápidos. Se trata generalmente de hidrocarburos policíclicos que por la forma de su estructura molecular, de manera inherente poseen la propiedad de luminiscencia [9].

El proceso de fotoluminiscencia al interior de un plástico centelleador ocurre cuando una partícula suficientemente energética colisiona con una molécula del plástico ionizándola y excitando sus moléculas; en el proceso de excitación de la molécula y su transición a un estado estable es cuando se da la fotoluminiscencia. Parte de la energía de excitación de las moléculas afectadas por la partícula incidente es reemitida como fotones en todas direcciones, con una energía proporcional a los niveles electrónicos excitados a los que llegaron.

El detector de centelleo además de contar con un plástico centelleador, lleva acoplado un tubo fotomultiplicador (Photo Multiplier Tube) quien se encarga de la colección de la luz al interior del plástico y su conversión en electrones para después multiplicarlos y al final arrojar una señal eléctrica. Ambos se deben encontrar perfectamente aislados de la luz exterior a modo de leer únicamente la luz emitida por el plástico al paso de una partícula ionizante.

El acoplamiento entre la lente (fotocátodo) y el centelleador, se realiza mediante un fluido que homogeneiza los índices de refracción de los dos materiales, con lo que las pérdidas de luz en el proceso de transferencia del plástico al fotocátodo son minimizadas. Generalmente el fluido utilizado es grasa óptica [10].

El tubo fotomultiplicador (PMT) tiene la apariencia de un bulbo, consta de una lente extremadamente sensible a la luz y un arreglo de electrodos que mediante una diferencia de potencial, producen un efecto de multiplicación. La sensibilidad de la lente es tal, que es capaz de captar las pequeñas emisiones de fotones generadas al interior del plástico centelleador cuando incide en él una partícula ionizante. Una vez que estos fotones entran a la lente del tubo, se producen fotoelectrones debido al efecto fotoeléctrico, pues el material del que está construida la ventana del lente (ver figura 7) propicia dicho efecto.

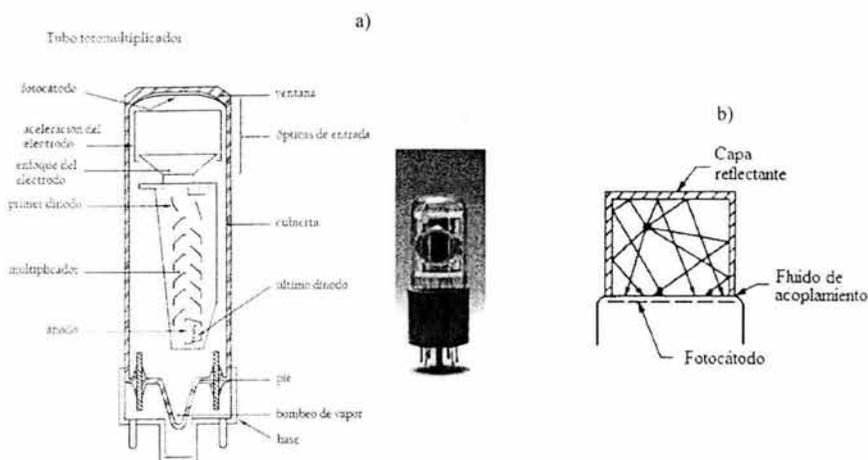


Figura 7. a) Esquema de un tubo fotomultiplicador y su apariencia física.
b) Acoplamiento de plástico centelleador al PMT.

Los electrones son acelerados por una diferencia de potencial en el fotocátodo que los manda a unos electrodos llamados dínodos, en donde estos electrones son acelerados por la diferencia de potencial que es mayor a la del primer dínodo, enviándolos al segundo dínodo, en donde se repite el proceso, incrementando cada vez más la diferencia de potencial y a la vez, el número de electrones. El factor de multiplicación de los tubos de los que se disponen hoy en día, es de 10^9 , siendo posible encontrar factores aún mayores. La fuente de voltaje es una base independiente del tubo, que facilita el cambio del PMT cuando se dañan. Finalmente, mediante un acoplamiento capacitivo se obtiene una señal eléctrica amplificada correspondiente al paso de radiación ionizante por el plástico centelleador.

1.4 ¿Por qué cámaras multialámbricas?

La finalidad del detector que se construirá, es poder determinar las direcciones con las que inciden al detector los rayos cósmicos, y así sentar las bases de lo que será el detector que se colocará bajo la pirámide del Sol en Teotihuacan. El tipo de detector empleado deberá ser capaz de ubicar espacios vacíos a su interior, por lo que debe ser sensible a la posición, para así obtener un espectro de incidencias que mostrará la mayor o menor incidencia de rayos cósmicos sobre ciertas partes de la pirámide, dando como resultado una especie de radiografía de la pirámide. Los detectores multialámbricos son capaces de determinar la posición en que incide al detector una partícula ionizante. Aunado al hecho de que la resolución en posición que brindan este tipo de detectores es muy buena (del orden de milímetros), son la mejor elección para los fines del proyecto.

Las características y principio de operación de los detectores multialámbricos se abordan con detalle en el siguiente capítulo.

2. Detectores gaseosos.

2.1 Principio de funcionamiento.

Los detectores gaseosos tomaron un gran impulso dada su versatilidad de comportamiento en función de las distintas regiones de voltaje en las que operasen, según el tipo de radiación de interés. Antes de dar paso a la explicación del funcionamiento de estos detectores en función del voltaje, hablaremos de los fenómenos que ocurren con el gas cuando éste se encuentra al interior de un detector en operación.

Cuando una partícula cargada con la suficiente energía para ionizar el gas (partícula ionizante) atraviesa el detector, arranca uno o varios electrones de los átomos del gas dejándolos libres, en este momento se han creado los primeros pares ión-electrón y por ser originados por la partícula ionizante, reciben el nombre de ionización primaria.

Puesto que la energía con que las partículas ionizantes llegan a los detectores son generalmente muy altas (>10 GeV), la energía con la que son creados los pares ión-electrón primarios es también muy alta, por lo que los electrones liberados adquieren dichas energías y tienen la capacidad para generar otros pares ión-electrón. A estos nuevos pares les nombraremos pares secundarios por haber sido generados por electrones previamente liberados.

Los electrones secundarios pueden ya no tener tanta energía por lo que podrían no ser capaces de liberar nuevos electrones. En un proceso natural de reacomodo, las moléculas ionizadas tienden a buscar mecanismos para llegar a su estado original, en este proceso puede ocurrir que electrones sean liberados, la formación de iones negativos o la expulsión de fotones [11]. Al conjunto de pares ión-electrón primarios y secundarios se le conoce como ionización total y a partir de ella se define la *energía de ionización* como la energía promedio necesaria para la creación de un par ión-electrón por unidad de energía perdida en el gas. La energía de ionización varía dependiendo del tipo de gases que se utilicen, y es importante notar que cuando se mezclan gases esta energía es menor que la de sus componentes. Se puede observar este aspecto en la tabla 2.1. Una vez que se tienen los pares ión-electrón hay que echar mano de ellos y dependerá del diseño del detector si se usan los electrones o los iones.

Para el caso de los detectores proporcionales, la presencia de un alto voltaje implica adicionar efectos de ionización en el gas debido al campo eléctrico que se genera. Este campo acelera los iones o electrones según sea la polaridad del voltaje aplicado, de esta forma los electrones o iones secundarios se aceleran y golpean nuevas moléculas del gas ionizándolas, y así sucesivamente hasta que observamos que el producto de tantas interacciones resulta en una avalancha de electrones o iones, según sea el caso. Las avalanchas generadas en este proceso son las que se emplean para la medición de la radiación, ya que se puede encontrar la relación que guarda el voltaje empleado y el total de partículas ionizadas del gas (ver figura 9). Además de que las magnitudes de carga eléctrica aunque pequeñas, ya no son despreciables y pueden ser utilizadas por la electrónica destinada a la medición de cargas eléctricas.

GAS	POTENCIAL DE EXCITACIÓN [eV]	POTENCIAL DE IONIZACIÓN [eV]	ENERGÍA DE IONIZACIÓN [eV]
H ₂	10.8	15.4	37
He	19.8	24.6	41
N ₂	8.1	15.5	35
O ₂	7.9	12.2	31
Ne	16.6	21.6	36
Ar	11.6	15.8	26
Kr	10.0	14.0	24
Xe	8.4	12.1	22
CO ₂	10.0	13.7	33
CH ₄	*	13.1	28
C ₄ H ₁₀	*	10.8	23

Tabla 2.1 Energía de ionización para varios gases, tomada de la referencia [12].

Cámara de ionización

La configuración básica de estos detectores es un cilindro metálico de paredes delgadas con un alambre central (ver figura 8). El cilindro es llenado con un gas de fácil ionización, aunque también podría usarse aire. Normalmente se utiliza una mezcla de un gas inerte (como el argón) con un gas orgánico. La función del gas inerte es proporcionar las condiciones necesarias para tener un medio fácilmente ionizable, mientras que el otro gas actúa como un controlador del efecto de avalancha que se produce en las cercanías del alambre una vez que se da la ionización, y que podría llegar a causar una condición de descarga continua.

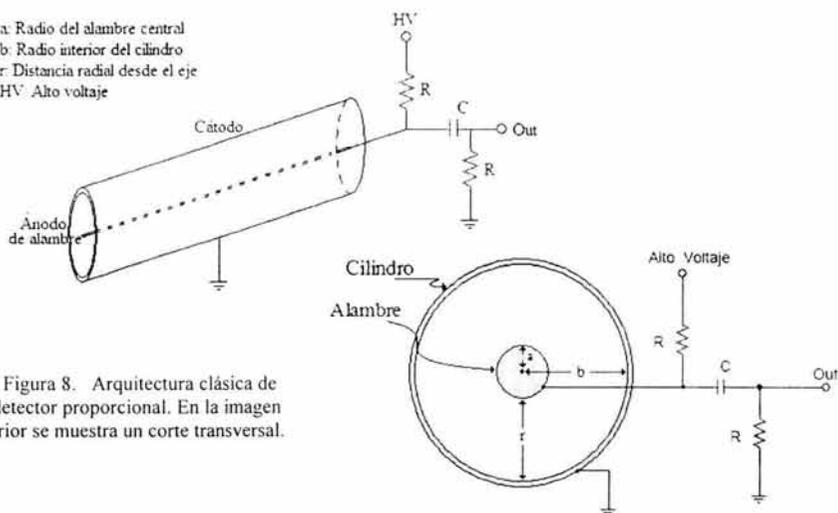


Figura 8. Arquitectura clásica de un detector proporcional. En la imagen inferior se muestra un corte transversal.

* Valores aún no identificados.

Al alambre se le aplica alto voltaje positivo, por lo que lo llamaremos ánodo y al cilindro que tiene potencial neutro, cátodo. Cuando una partícula pasa por el detector, si tiene la energía necesaria, ionizará el gas, el alto voltaje en el alambre genera un campo eléctrico de intensidad

$$E = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (2.1)$$

que es el encargado de acelerar los electrones (en caso de aplicar alto voltaje negativo) hacia el ánodo y los iones a las paredes del contenedor¹⁰, en donde son colectados y enviados a la instrumentación electrónica encargada de la medición. La correcta aplicación del voltaje al ánodo se traduce en lecturas confiables, así como la producción de ionizaciones secundarias dentro del contenedor, originadas por la aceleración de los iones y electrones por la intensidad del campo eléctrico.

Para este tipo de detectores la magnitud del voltaje aplicado es de suma importancia, distinguiendo la región en la que operará y por lo tanto, su comportamiento (cámara de ionización, proporcionales o Geiger-Müller).

En la figura 9 se aprecian las regiones de operación de los detectores gaseosos en función del voltaje aplicado al ánodo. En la región I, dada la debilidad del campo eléctrico la velocidad que adquieren iones y electrones no es suficiente para llegar al cátodo, por lo que se recombinan fácilmente. Por lo tanto, ésta región no se usa.

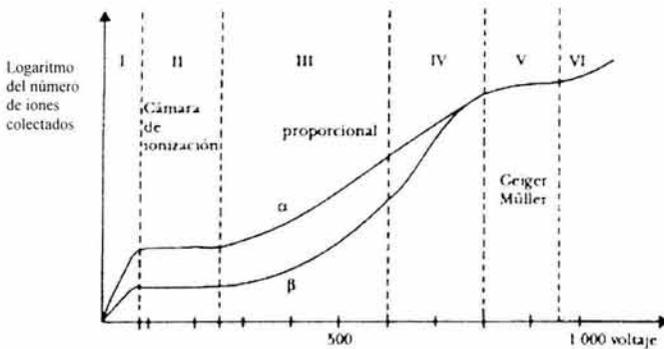


Figura 9. Comportamiento del detector gaseoso de acuerdo con el voltaje aplicado.

¹⁰ Llamamos contenedor a la estructura física dentro de la cual se colocarán tanto los cátodos como el ánodo. Al ser una estructura cerrada, es posible llenarla de gas, el cual facilita los procesos de ionización.

En la región de voltaje II, el número de iones colectados no cambia si se aumenta el voltaje. Se recogen en los electrodos esencialmente todos los iones primarios; es decir, no hay ni recombinación ni ionización secundaria. Por esta razón, el tamaño del pulso depende de la ionización primaria y, por lo tanto, de la energía depositada por cada radiación. Se llama región de *cámara de ionización* y se usa para medir la energía de la radiación, además de indicar su presencia. En general, la corriente generada en estas cámaras es tan pequeña que se requiere de un circuito electrónico amplificador muy sensible para medirla [7].

Detector proporcional

En la región III, llamada *proporcional* o de *proporcionalidad*, la carga colectada aumenta al incrementarse el voltaje. Esto se debe a que los iones iniciales (primarios) se aceleran dentro del campo eléctrico pudiendo, a su vez, crear nuevos pares de iones. Si uno sube el voltaje, la producción cada vez mayor de ionización secundaria da lugar a un efecto de multiplicación. Los pulsos producidos son mayores que en la región anterior, pero se conserva la dependencia en la energía de las radiaciones.

Aumentando aún más el voltaje, se llega a la región IV, llamada de *semi-proporcionalidad* o *proporcionalidad limitada*, que por su inestabilidad de operación entre proporcionalidad y Geiger-Müller es poco útil en la práctica. Si sigue aumentándose el voltaje, se llega a la región V, llamada *Geiger-Müller*. En esta región la ionización secundaria y la multiplicación son tan intensas que se logra una verdadera avalancha de cargas en cada pulso. Los pulsos son grandes por la gran cantidad de iones colectados, pero se pierde la dependencia en la ionización primaria. Finalmente en la región VI se tiene una intensidad tan grande de campo eléctrico que todo el tiempo se tienen descargas e incluso no se requiere de partículas ionizantes que comiencen el proceso de multiplicación. A esta región se le conoce como de *descarga continua*.

Contador Geiger-Müller

Los detectores Geiger-Müller (o sencillamente contadores Geiger) que operan en esta región son indicadores de la presencia de radiación, pero no pueden medir su energía. Son los más usados porque son fáciles de operar, soportan trabajo pesado, son de construcción sencilla y se pueden incorporar a un monitor portátil. Generalmente operan con voltaje de alrededor de 700 a 800 volts, pero esto puede variar según el diseño de cada detector. El tamaño de los pulsos que se generan en este detector siempre son de la misma amplitud, sin importar el número de pares ión-electrón que inician el proceso de multiplicación. Por esta razón, este detector se emplea solamente con la finalidad de conteo.

El contador Geiger-Müller puede ser utilizado para el conteo de cualquier tipo de radiación, dado su principio de operación, aunque la eficiencia no será uniforme para todos los casos.

Si se incrementa el voltaje aún más, se obtiene una descarga continua (región VI), no útil para conteo, pues exista o no una partícula ionizante de por medio, el detector estará produciendo descargas eléctricas como si indicara el paso de partículas ionizantes.

2.2 Cámaras multialámbricas.

La cámara proporcional multialámbrica (MWPC multiwire proportional chamber) fue inventada por Charpak y su grupo de colaboradores entre 1967 y 1968 [13]. Los detectores que hasta entonces se habían desarrollado proporcionaban información acerca de la trayectoria de las partículas de forma gráfica mediante emulsiones fotográficas, por lo que para el estudio de un *evento*¹¹ era necesario el análisis de cada una de las imágenes obtenidas durante la medición. Además de laboriosa y tediosa, los resultados obtenidos mediante esta técnica eran poco precisos.

La MWPC surge de la idea de agrupar una serie de detectores proporcionales para obtener de cada uno de ellos una señal distinta, de este modo se tendría ubicada la región en la que pasó la partícula. La construcción de un sistema de estas características utilizando detectores proporcionales individuales resultaría poco práctico, pues el espacio que cada uno de ellos ocupa a pesar de estar agrupados, disminuiría la resolución del detector. Para concretar esta idea, Charpak y su grupo de colaboradores idean el armar un ánodo de varios alambres del mismo diámetro colocados de forma paralela y con una misma separación, e introducirlo dentro de un solo contenedor. La forma de este detector es la que se muestra en la figura 10, los cátodos son placas paralelas en donde aplicamos alto voltaje y en el ánodo que se encuentra entre los cátodos, potencial neutro [14].

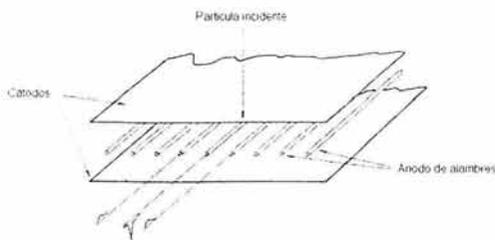


Figura 10. Arquitectura básica de un detector multialámbrico.

Charpak demostró que los efectos capacitivos que se forman entre los alambres se eliminan con las señales positivas inducidas en los alrededores del ánodo, logrando que cada alambre funcione como un detector independiente. Las señales que se colectan en cada uno de los alambres se deben a que la partícula ionizante a su paso por el detector ha ionizado el gas del que está llena la cámara multialámbrica. El alto voltaje aplicado a los cátodos produce un efecto de repulsión de carga eléctrica, de modo que envía los iones o electrones según la polaridad del alto voltaje, hacia los alambres que se encuentran a un potencial neutro. Según sea la magnitud del voltaje aplicado a los cátodos y la energía de la partícula ionizante con que incide en el detector, se producirá el efecto de avalancha de mayor o

¹¹ Llamamos *evento* a la ocurrencia de ionización del gas al interior de las cámaras multialámbricas, producto del paso de una partícula ionizante (muón) por el sistema de detección.

menor intensidad, por lo que al final, en los alambres cercanos al lugar de incidencia de la partícula ionizante habrá una colección importante de carga. El alambre más cercano al lugar por el que la partícula ionizante atravesó el detector, será el que mayor cantidad de carga colecte.

Una vez que se colecta la carga en los alambres, ésta es llevada a un preamplificador sensible a la carga, quien se encarga de magnificar la corriente originada en el proceso de avalancha y la lleva a un dispositivo gráfico en el cual puede ser fácilmente interpretada. En este caso, el dispositivo se trata de un osciloscopio, en él, podemos observar la formación de los pulsos originados por el paso de una partícula ionizante a través del detector.

Para el caso de las MWPC se tiene que la intensidad del campo eléctrico varía dependiendo de la posición de los alambres y del diámetro de los mismos. Por ello es muy importante que todos los alambres estén perfectamente colocados sobre el mismo plano y que el diámetro del alambre sea lo más delgado posible.

Para un detector multialámbrico que tiene voltaje negativo aplicado en sus cátodos, la forma del campo eléctrico formado es casi la de líneas paralelas, con excepción en las proximidades del alambre en donde, dependiendo de la colocación y el grosor de los alambres, esta variación será más o menos importante (ver figura 11).

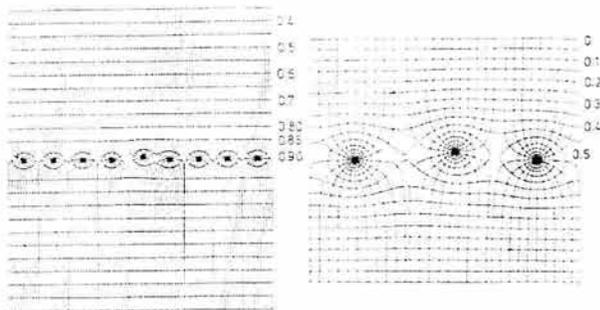


Figura 11. Comparación de la forma del campo eléctrico cuando los alambres no son colocados en el mismo plano [11].

Cabe señalar que la configuración de una cámara multialámbrica de un solo ánodo será capaz únicamente de detectar la posición por la cual la partícula ionizante atravesó el detector en un plano unidimensional. Para poder determinar la posición en un plano cartesiano (coordenadas x , y) se requiere de un segundo ánodo, el cual debe colocarse perpendicularmente al primer ánodo, a modo de formar una cuadrícula. Así, identificado el alambre del primer ánodo más cercano al lugar por el que incidió la partícula ionizante, sigue la identificación del alambre del segundo ánodo, llegando así, a la identificación de una coordenada xy de posición correspondiente al lugar de incidencia. Es común llamar a los ánodos "*plano x* " y "*plano y* " cuando se analiza la información (ver figura 12).

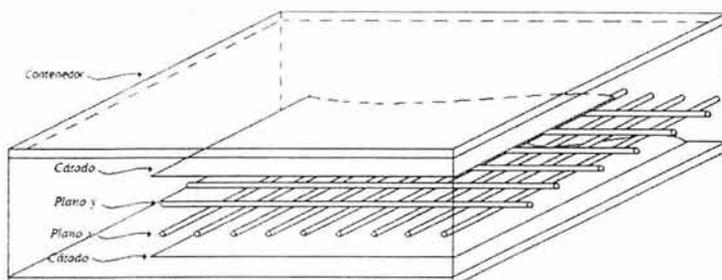


Figura 12. Configuración de una cámara multialámbrica xy.

Para tener una coordenada tridimensional, se necesitaría identificar un par de coordenadas xy en donde la primera coordenada deberá estar separada de la segunda por una distancia h . Para ello se requiere de dos detectores independientes, colocados uno arriba del otro, para así obtener de cada uno de ellos una coordenada xy . De este modo se logra identificar la trayectoria que siguió la partícula incidente, ya no solo en un plano de dos dimensiones, sino en un plano tridimensional. Es de importancia esta consideración, pues al pensar en que se quiere buscar algún indicio de entierro oculto al interior de la pirámide del Sol, se tiene que conocer la trayectoria con que las partículas ionizantes inciden al detector, para poder relacionar los conteos de partículas con el lugar correspondiente en la pirámide.

La relación entre campo eléctrico y diámetro del alambre resulta en la generación de procesos de avalancha más o menos intensos. Experimentalmente se ha encontrado que con el empleo de alambres con diámetros menores a 100 micras, es posible generar procesos de avalancha con diferencias de potencial del orden de 10^3 V, ya que las intensidades de campo eléctrico que se producen son de decenas de V/cm. El tener campos eléctricos de estas magnitudes, facilita la orientación de los electrones en la dirección de las líneas del campo llevándolos hacia el ánodo, evitando así su dispersión y reduciendo la posibilidad de que sean neutralizados antes de ser colectados por el ánodo.

Los parámetros importantes de un detector multialámbrico son la separación entre alambres, el diámetro del alambre y la separación entre ánodo y cátodo. La variación de cualquiera de ellos se ve reflejado en los resultados de la medición, sin que la variación del resto de los factores sea necesariamente proporcional. Por ejemplo, el reducir la separación entre alambres de 2 mm a 1 mm implica elevar el voltaje por lo menos al doble, si se quiere mantener la misma colección de carga.

2.3 Métodos de lectura electrónica.

Una vez que se tiene carga colectada en los ánodos, positiva o negativa según sea la polaridad del voltaje aplicado a los cátodos, es momento de llevarla a la instrumentación que la registrará. Para identificar en qué alambres se colectó dicha carga, se han ideado

varios métodos de los cuales unos son más funcionales que otros. El que se puedan identificar los alambres que colectan esta carga, se traduce en que el detector pueda localizar la posición con la que incidió la partícula al mismo, por ello, se dice que estos detectores son sensibles a la posición.

El método inicialmente utilizado para leer la información proveniente de los alambres fue el colocar para cada alambre su propia instrumentación electrónica, pues se considera que cada alambre es un detector independiente del resto. Esta opción resulta muy costosa además de ser poco conveniente por cuestiones de espacio. Se presentaron métodos alternos que abatieran costos y simplificaran la instrumentación de adquisición de datos, dos principales son el método de división de carga y el método de retraso de tiempo [12].

División de Carga.

El método de división de carga consiste en hacer pasar la carga de cada alambre por una cadena resistiva conocida, la carga total colectada es un dato que se puede medir y por tanto también se conoce, y de igual manera el número de alambres, por lo que para encontrar el alambre en el que se originó la señal, se mide la carga en un extremo de la cadena resistiva y de ahí se puede inferir el alambre en el cual se originó la señal. Se basa en el concepto de divisor de voltaje. La figura 13 ilustra la manera en que se realiza la medición de las señales empleando este método.

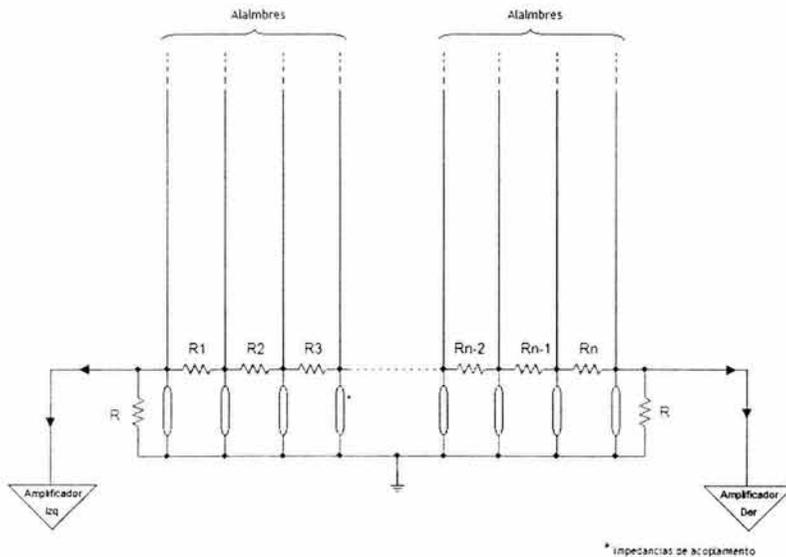


Figura 13. Esquema del método de división de carga para la determinación de la posición.

Este método requiere de dos preamplificadores sensibles a la carga, que además de amplificar la señal, eliminan el ruido eléctrico propio del sistema, permitiendo tener señales más claras facilitando la ubicación de la posición. La desventaja del método es que los rangos de tiempo en que se procesan las señales son del orden de microsegundos, lo que limita la capacidad de conteo.

Retraso de tiempo.

El método de retraso de tiempo consiste en formar una línea de retraso entre cada alambre, siendo este tiempo de retraso conocido y constante. Para conocer el alambre en el que ocurre el evento se toma de referencia un extremo de esta cadena y al restarle el tiempo de retraso con que llega la señal al instrumento de medición, se tendrá un factor de tiempo que dependerá del alambre en el que ocurrió la incidencia de la partícula.

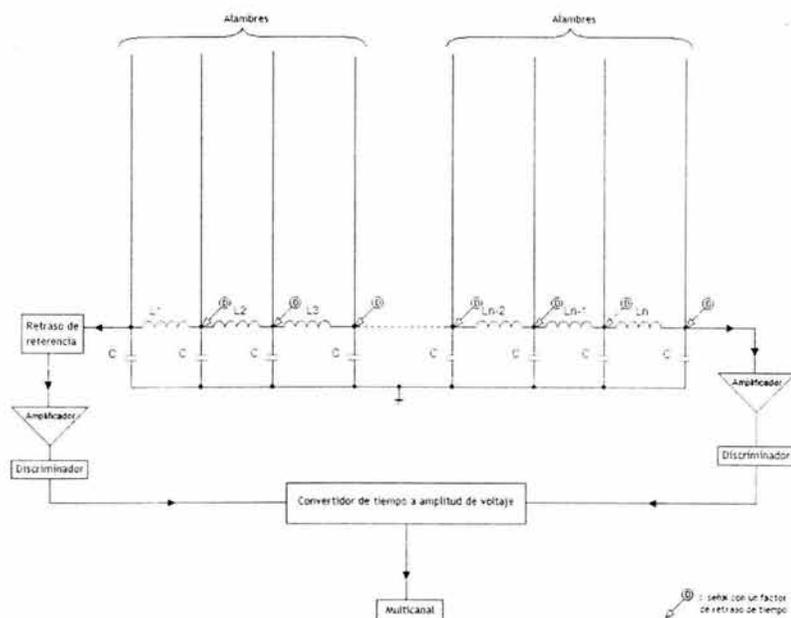


Figura 14. Esquema de la instrumentación de un detector multialámbrico con el método de retraso de tiempo.

Actualmente existen en el mercado componentes electrónicos capaces de retardar señales en tiempo en órdenes de nanosegundos con tolerancias del 5% que, aunque parezca poco admisible, es suficiente para la aplicación a que se enfoca. El circuito integrado SIP5-405

por ejemplo, es una línea de retraso de diez líneas, con un retraso total de 40 ns, para el cual el fabricante indica una tolerancia de ± 2 ns en total, lo cual no es muy significativo, como se verá más adelante. La figura 14 muestra la forma en que se debe instrumentar un detector multialámbrico con el método de retraso de tiempo.

Cuando se implementa la lectura de los detectores multialámbricos con este método, se tiene una alta capacidad de conteo por la velocidad a la que se procesan las señales (nanosegundos), sin embargo, exige al sistema ser lo más limpio posible, pues como las señales van directas a los preamplificadores sin pasar por filtros (para evitar deformar la señal en tiempo), todo lo que entra a ellos es amplificado, incluido el ruido.

3 Diseño del detector

3.1 Introducción

La exploración del interior de la Pirámide del Sol en Teotihuacan utilizando la misma técnica que Álvarez en Giza, como se mencionó anteriormente, es posible dada la existencia de un túnel subterráneo que pasa por debajo de la pirámide y llega casi hasta su centro (ver figura *i*). El contar con este túnel nos permite colocar un sistema de detección bajo la pirámide y, al igual que hizo Álvarez, tratar de identificar si al interior de la pirámide existe rastro de una bóveda o algo similar, sin necesidad de perforarla.

Cuando se hace referencia al “sistema de detección”, se habla del conjunto de detectores (detectores de centelleo y mwpc), sistemas electrónicos y equipo de cómputo necesarios para la detección de muones, que serán colocados bajo la pirámide. En el presente trabajo solamente nos enfocaremos al diseño del detector multialámbrico (mwpc), que a su vez, forma parte del sistema de detección.

Como punto de partida para nuestro diseño, se deben tomar en cuenta las condiciones en que operará el detector y sobre la marcha hacerle modificaciones hasta lograr el punto óptimo para las condiciones que se requieren. Por tanto, el lugar en el que el detector quedará operando, así como las condiciones ambientales en que se encuentre, son factores muy importantes que intervienen en el diseño [15].

Para conocer a detalle las características que presenta el túnel que hemos mencionado, realizamos varias visitas a su interior en donde observamos que factores como la geografía propia del túnel, así como la humedad que se tiene al interior del mismo, serán los principales retos a vencer en la construcción del detector. El túnel 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 entrada al túnel se hace por medio de una pequeña puerta metálica que mide 1x2 metros, conecta con una escalera metálica por la que se desciende aproximadamente 8 metros para llegar al nivel del túnel. Consecuencia de su origen natural, el túnel carece de una estructura uniforme, por lo que varía tanto en altura como en amplitud. En las partes más difíciles para el acceso la altura del túnel es de apenas 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 cuidado para no sufrir una lesión. La oscuridad al interior del túnel es total, sólo se tiene una pequeña cantidad de luz a la entrada, pero desaparece en pocos metros por lo sinuoso del camino.

Cuando se comienza a recorrer el túnel se puede sentir una fuerte humedad que disminuye un poco cuando se llega al final, en los primeros metros incluso es posible encontrar gotas de agua en las paredes y en el techo, que van desapareciendo conforme se acerca el final del camino en donde la humedad registrada es del 95%. A lo largo de todo el túnel la

temperatura es de 21° C y al igual que la humedad, no varían significativamente durante el año.

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 colocación de toda la instrumentación necesaria para el proyecto.

Se ha previsto el introducir una guía de focos a lo largo del túnel para iluminar lo más posible el camino, pues con las lámparas de mano es inevitable el golpearse en alguna parte del recorrido, ya que la luz que proporcionan no es lo suficientemente fuerte como para advertir todas las piedras que van apareciendo en el recorrido. De esta manera se tendrá la facilidad de emplear ambas manos al momento de introducir todos los elementos del sistema de detección. Cuando pensamos que elementos como los centelleadores y las cámaras multilámblicas tienen áreas de 1 m², el llevarlas hasta el fondo del túnel será todo un reto, pues al menos, cada uno de estos elementos se estima pesarán alrededor de 40 kilogramos y son de manejo delicado, por lo cual, se debe evitar el golpearlas accidentalmente a lo largo del túnel.

Previamente se ha hecho un simulacro de la forma en que entrarán los detectores al túnel y observamos que el área de 1 m² para un detector es lo máximo permisible por cuestiones de espacio. De ser más grandes, no se podrían introducir al túnel, pues recordemos que la puerta de entrada es de 2 x 1 m, y no se nos permite hacer modificaciones en el monumento. Lo anterior se aprecia en la figura 15.



Figura 15. En las imágenes observamos la forma en que entrará el detector, así como parte del interior del túnel.

El haber simulado la entrada al túnel con lo que serían los detectores, nos sirvió para darnos cuenta de las limitantes que debe tener nuestro diseño, pues vemos que tanto el tamaño del detector, el material de que debe estar hecho, su arquitectura y otros aspectos, están en función de las características del lugar en que deberá operar. Si no se les da la importancia que tienen a estos factores, el resultado será un detector defectuoso que en el mejor de los

casos se deba reparar en el lugar, pero que también podría dañarse al grado de no tener compostura, pérdida que implica tiempo y dinero.

De las visitas al lugar, notamos que el transporte desde Ciudad Universitaria hacia Teotihuacan será otro aspecto que no se debe descuidar, dadas las malas condiciones en que se encuentra el asfalto a lo largo del trayecto. El problema se acentúa al llegar a la entrada de la zona arqueológica, por ser un camino de terracería el movimiento de los vehículos es intenso, lo que puede llegar a ser problemático para las cámaras multialámbricas, y pondrá a prueba la resistencia de los alambres que la conforman.

3.2 Requerimientos y especificaciones de diseño

Como hemos mencionado, en el presente trabajo nos enfocamos a la realización de un detector multialámbrico, que a su vez forma parte del sistema de detección; su función dentro del sistema de detección se detalla a continuación.

La construcción de un detector multialámbrico sensible a la posición tiene el objetivo de localizar en un plano cartesiano, el punto en que una partícula ionizante ha cruzado el detector. Así, si se coloca un arreglo de al menos dos detectores multialámbricos en el que uno se encuentre arriba del otro, se logrará determinar la ubicación en que la partícula ha atravesado a cada uno de ellos y por consiguiente, se puede obtener la reconstrucción en tres dimensiones de la trayectoria de la partícula.

El sistema de detección está pensado para detectar muones que pierdan energía de manera constante, lo que es válido únicamente para partículas de mínima ionización (*minimum ionizing particles* = *mips*). Este tipo de partículas se caracterizan principalmente porque ceden la misma cantidad de energía¹² al atravesar un medio. La densidad del material que es atravesado, es la que determina el valor de energía que pierden las *mips* al atravesarlo. En el caso de la pirámide del Sol, la densidad estimada de los materiales de que está compuesta es de $\rho = 1.9 \text{ g cm}^3$ [16], 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 podremos detectar serán los que tengan energías mayores a 18 GeV [16] antes de entrar a la pirámide. A pesar de que existen muones con energías mayores a 100 GeV, la frecuencia con que ocurren es de dos a tres órdenes de magnitud menor a la de muones con energías de unas cuantas decenas de GeV [17], por lo que su contribución no es tan significativa.

¹² Aproximadamente $2 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ [13].

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 multilámbricas. 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 obtenida de las cámaras multilámbricas correspondiente a dicho evento. Y es que la utilización de estos dispositivos de verificación es necesaria, pues los detectores multilámbricos son sensibles también a otro tipo de radiación diferente a la cósmica, como por ejemplo, a la emitida por las lámparas de neón, la proveniente de los muros de concreto, la que nosotros mismos emitimos, etc., a esta radiación se le conoce como radiación de fondo. Por lo tanto, en esta configuración los detectores de centelleo fungen como dispositivos de verificación (evitando tomar en cuenta eventos distintos a los provocados por rayos cósmicos), mientras que las cámaras multilámbricas lo hacen como detectores de posición. La disposición del sistema de detección se muestra en la siguiente figura.

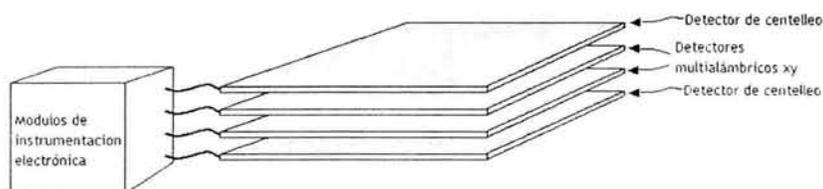


Figura 16. Propuesta del sistema de detección.

Tomando en cuenta que es la primera vez que se construye un detector de este tipo en nuestro país y por tanto no se tiene la experiencia previa en lo que implica la construcción de un detector de estas características, es que optamos por la construcción de un prototipo. La ventaja que representa el construir un prototipo antes de comenzar con el “*modelo real*” es que nos permite experimentar con diferentes materiales y técnicas de construcción, haciendo posible comparar la ventaja de utilizar distintos materiales sin que la inversión sea muy significativa, a la vez que se gana tiempo y experiencia. No obstante, no olvidamos que al momento de escalar el prototipo hasta su tamaño real, seguramente se presentarán efectos que puedan afectar el funcionamiento del detector, pero en su momento serán resueltos.

Para comenzar con el diseño del prototipo de nuestro detector multilámbrico, establecemos inicialmente las siguientes condiciones: el diseño obtenido debe garantizar un correcto funcionamiento del detector, cuyo costo haya sido el más bajo posible, seguro para los operadores, funcionamiento de por lo menos un año libre de mantenimiento, fácil de reparar, y por último, construcción en el menor tiempo posible.

Para conseguirlo, no debemos desatender condiciones como: el transporte, en donde seguramente recibirá impactos que pongan en riesgo la integridad del detector; la humedad del medio ambiente, en que permanecerá trabajando las 24 horas del día en un periodo de

tiempo de al menos un año; monitoreo remoto del sistema desde Ciudad Universitaria, por lo que en caso de falla la reparación no es inmediata.

3.3 Dimensiones

El objetivo de nuestro detector multialámbrico es detectar el mayor número de muones que sea posible a su paso por la pirámide. Consecuentemente, podríamos pensar en construir un detector que tuviera un área igual que la base de la pirámide, sin embargo, esto no es factible por cuestiones físicas y económicas, además de ser innecesario.

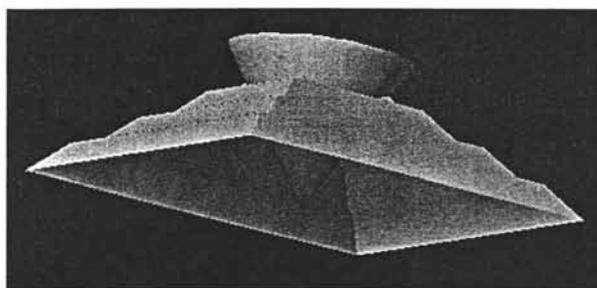


Figura 17. Representación gráfica del ángulo sólido sobre la pirámide.

Cuando se colocan dos detectores uno encima de otro, con una cierta separación entre ellos, se forma lo que se conoce como “ángulo sólido”, que permite tener una mayor área de detección con una menor separación entre detectores. Aplicando este concepto a nuestro sistema de detección, tenemos que al colocar bajo la pirámide los detectores en esta configuración, se formará sobre ellos un prisma sólido. Así pues, los muones que incidan en la pirámide dentro del volumen correspondiente al prisma, serán vistos por nuestros detectores. El volumen del prisma depende del ángulo sólido del mismo, el cual está en función de la separación existente entre los detectores.

Como la puerta de entrada al túnel no permite la entrada a objetos mayores a 1 m, y que nuestro deseo es el tener un detector del mayor tamaño posible, es que sujetos a dicha restricción, el área del detector multialámbrico se define como de 1 m^2 . Gráficamente se observó que con una proyección paralela a los detectores de un ángulo de 120° se cubriría gran parte de la pirámide, por lo que definidos el ángulo sólido y el tamaño del detector, se calculó la separación entre detectores [16] necesaria para lograr un área de detección en la pirámide lo suficientemente grande, con un detector de tamaño reducido. Por lo tanto, la separación que deberá existir entre detectores xy es de 10 cm.

Se estima que con una proyección paralela al detector de un ángulo de $\pm 60^\circ$ sea suficiente para localizar el rastro de algún indicio de túnel o cámara mortuoria, pues no hay

antecedente arqueológico de que dichas cámaras estén ubicadas en las esquinas de los monumentos. Generalmente estos aposentos están localizados en la parte central de la pirámide, ya sea a nivel del piso o cerca de la parte más alta de la pirámide. Como se observa en la figura 17, el cono de detección quedará situado en la parte central de la pirámide, justo en la zona en que se especula puedan estar dichas cámaras. Debido a que la forma de los detectores es cuadrada, la forma del ángulo sólido sería más bien la de un prisma, sin embargo, para efectos de ilustración es que en la figura 17 se representó con un cono.

Ya que se define el tamaño del detector en 1 m^2 , el prototipo se hará a una escala 1:10, resultando en un área activa de 100 cm^2 . El área activa de un detector multialámbrico es la correspondiente al área ocupada por los alambres que la conforman; es en ella en donde se llevarán a cabo los procesos de recolección de carga en los alambres, producto de la ionización causada por el paso de partículas ionizantes. El tamaño total del detector incluye el tamaño del área activa.

3.4 Líneas de Retraso (Delay Lines).

Aunque para la lectura de las cámaras multialámbricas no sea necesaria la implementación de los detectores de centelleo, sí será necesario hacerlo posteriormente, cuando se trate de la adquisición de los datos que puedan proporcionar información acerca de la posición en que inciden los rayos cósmicos al detector. La función que tendrán los detectores de centelleo, será la de asegurar el paso de una partícula ionizante por el sistema de detección. De esta manera, inicialmente se construirá el mwpc hasta lograr su funcionamiento y, para efectos de calibración en la detección de muones, se realizarán mediciones con los detectores de centelleo.

El punto de partida para el diseño de nuestro detector es la forma en que se llevará a cabo la lectura electrónica del mismo. Por lo tanto, comenzamos con la elección del método en que tomaremos la información del mwpc de acuerdo con la configuración que se ha planteado del sistema de detección.

Puesto que nuestro interés está en tener un detector capaz de indicar la posición en que una partícula ionizante incide en él, de los métodos mencionados, el de retraso de tiempo es el que de una manera mucho más fácil podrá indicar esa posición. Este método representa una ventaja sobre el método de la cadena resistiva, pues sólo retrasa la señal generada durante el evento ionizante, mientras que en el otro método, la señal es atenuada por una cadena resistiva para encontrar la correspondencia en posición. Esto representa un inconveniente, pues las señales muy débiles correrían el riesgo de ser atenuadas en su totalidad, por lo que no se tendría la lectura correspondiente a ese evento.

Al trabajar con líneas de retraso de tiempo, podemos obtener de una manera indirecta, el lugar en que pasa la partícula ionizante. Ocurre que, cuando tomamos las señales provenientes de la cámara multialámbrica, la señal que llegará primero a un extremo(derecho o izquierdo) de la línea de retraso, es la que se encuentre más cerca al

lugar de incidencia. Si conocemos el valor de esta cadena de retraso de tiempo, sabremos que al leer en cualquiera de los dos extremos de la cámara multialámbrica, la señal obtenida en el lado más cercano al lugar de la incidencia, estará retrasada un determinado tiempo x respecto de la señal que se lea en el lado opuesto. Este tiempo x , será correspondiente al retraso acumulado por cada uno de los alambres por los que pasó la señal, de manera que se puede inferir el alambre más cercano al lugar de incidencia. En el capítulo 5.8, se explica a detalle la forma en que se logra relacionar el retraso de tiempo con el lugar en que inciden las partículas al detector.

Debido a que se trabajará con señales retrasadas en tiempo, es importante que este retraso sea lo más constante que se pueda, de forma que tengamos la misma cantidad de retraso entre cada uno de los alambres que conforman el ánodo de nuestra cámara multialámbrica. En función de lo confiable que sean nuestras líneas de retraso, podremos tener una mayor precisión al momento de determinar los lugares en que incidan las partículas ionizantes.

Comercialmente hemos encontrado que la compañía *Rhombus Industries Inc.* fabrica los circuitos integrados que realizan la función de retrasar una señal. Proporciona dos formas de encapsulado que son: DIP14 y SIP5 cada uno con 14 pines, ver apéndice 1. Los tiempos de retraso son variados y van desde los 5 a los 500 nanosegundos para el caso del encapsulado DIP14 y de los 5 a los 100 ns para el caso del encapsulado SIP5.

Elegimos el modelo SIP5-405 por tener una geometría acorde a lo que se ha pensado respecto a su posición dentro del detector y por contar con un retraso total de 40 ns en diez líneas, retraso que cubre la limitante en un módulo de instrumentación electrónica en que se tiene un rango máximo de trabajo de 800 ns. Como veremos más adelante, la separación entre alambres será de 5 mm, por lo que si se quiere tener un área activa de 1 m^2 , el número de alambres que deberá tener dicho detector será de 200. Al multiplicar los cuatro nanosegundos que tiene cada línea de retraso por el número de alambres para el detector mencionado, tenemos un total de 800 ns, y por ende, estamos dentro del rango de trabajo del TDC quien nos restringe a trabajar en un rango máximo de 800 ns.

Este valor de línea de retraso estará sujeto a pruebas de funcionamiento con el detector y de acuerdo con su desempeño, se decidirá si se conserva o se modifica.

La atenuación que sufre la señal al momento de ser retrasada, fue otro factor importante que cuidamos, ya que al pasar por todas las etapas de retraso, nuestra señal debe tener la suficiente amplitud para verificar los eventos producto de las ionizaciones generadas en su interior. Esta amplitud será clave para distinguirla del ruido¹³ en la etapa de filtrado. Si no se tuviera una señal de amplitud considerablemente superior a las señales de ruido, la discriminación de señales sería poco eficiente y consecuentemente, tendríamos una mala confiabilidad del detector.

Considerando que toda la instrumentación electrónica necesaria para la lectura de las cámaras tiene como estándar una impedancia de entrada de 50Ω , el modelo de línea de

¹³ Consideraremos como ruido a todas las señales que se lean en el detector diferentes a las producidas por el paso de un muón. Esto incluye las señales producto de la radiación de fondo.

retraso SIP5-405 también cuenta con dicha impedancia. La importancia de que la línea de retraso tenga este valor de impedancia, es que queden perfectamente acopladas las impedancias tanto del detector como de los módulos de electrónica que medirán su salida, evitando así, una reflexión en las señales que pudiese confundir las lecturas de la cámara. La imagen de este circuito integrado y su diagrama eléctrico aparecen en la figura 18.

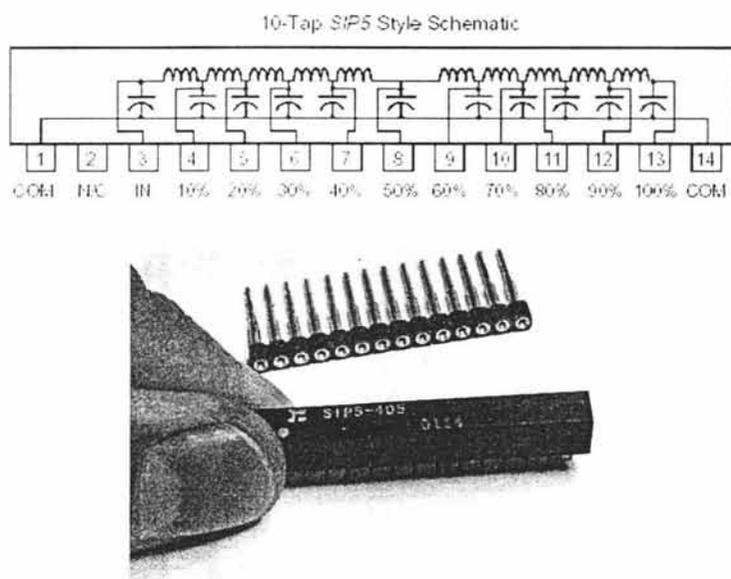


Figura 18. Línea de retraso SIP5-405.

A la salida del detector multialámbrico lo primero que se conectará será un preamplificador sensible a la carga, que se encargará de transformar la carga colectada en los alambres en voltaje y darle una pequeña amplificación, y de esta manera, poder llevar esta señal a los módulos de lectura.

Debido a que el método de lectura empleado será el de retraso de tiempo, una reflexión en las señales al interior de la cámara debido a un mal acoplamiento de impedancias, implicaría el tener una señal repetida de lo que fue un evento solitario. Es decir, una vez que una partícula ionizante atravesase el detector y en su interior se produjese el proceso de colección de carga en los alambres, ésta señal colectada en los alambres inicialmente viajaría hacia el preamplificador sensible a la carga quien cuenta con una impedancia de entrada de 50Ω . De no estar perfectamente acopladas las impedancias del detector y el preamplificador, en este momento ocurriría una reflexión en la señal proveniente del detector y sólo una parte de la señal seguiría hacia los módulos de lectura. La carga reflejada hacia el detector, una vez retrasada por las línea de retrasos regresaría hacia el

preamplificador en donde nuevamente una parte seguiría su camino hacia el resto de la instrumentación, y otra parte se reflejaría hacia la cámara multialámbrica. Ésta señal retardada por segunda ocasión, de ser lo suficientemente grande, indicaría a la instrumentación la ocurrencia de un evento cuando en realidad dicho evento no ocurrió, sino que corresponde a un evento que ya sucedió. Es entonces evidente la importancia de buscar un buen acoplamiento de impedancias entre el detector y el resto de la electrónica que se empleará para registrar las mediciones.

3.5 Alambre

Las placas paralelas que conformarán los cátodos del detector estarán conectadas a un alto voltaje, el cual formará líneas de campo eléctrico entre las placas. Estas líneas serán paralelas e irán de un cátodo a otro sin deformación, como medida del buen paralelismo que guarden las placas y la uniformidad de su superficie. De lograr unas placas completamente lisas y colocadas de manera tal que la distancia entre ellas sea la misma en cualquier punto, tendríamos unas líneas de campo como las que se muestran en la figura 19.

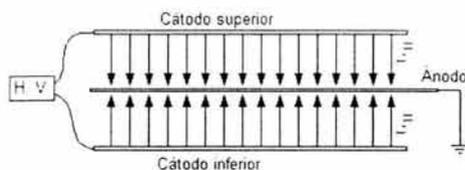


Figura 19. Líneas de campo eléctrico formadas entre los cátodos al aplicarles alto voltaje.

Si el ánodo se coloca justo en medio de los dos cátodos, y su potencial eléctrico es cero, al tener la misma polaridad los cátodos, las líneas de campo eléctrico buscarán llegar al ánodo. Cualquier partícula con carga eléctrica opuesta a la de las líneas de los cátodos entonces será repelida hacia el ánodo.

Ahora, teniendo el ánodo un potencial de referencia cero y conectando a los cátodos alto voltaje negativo, por el principio de repulsión de cargas eléctricas del mismo signo, tendremos que los electrones de carga eléctrica negativa, serán enviados hacia los alambres. Pero si las líneas de campo eléctrico formadas entre los cátodos son poco uniformes, como resultado tendremos una colección de carga poco precisa, ya que la colección de carga no se daría precisamente en el alambre más cercano al lugar de la ionización.

Causas de la deformación del campo eléctrico pueden deberse a deformaciones en los cátodos, o imperfecciones en el ánodo. En el ánodo lo que tenemos son alambres conectados a líneas de retraso y a un potencial cero. Si los alambres no son colocados al mismo nivel, se tendrá una deformación en las líneas de campo, como se muestra en la

figura 11. En este punto resalta la importancia que tiene la colocación de los alambres, cuando se busca tener líneas de campo eléctrico uniformes.

Producto de simulaciones vía software que se han realizado en el grupo de investigación de este proyecto por el Dr. Varlen Grabski [16], se ha llegado a la conclusión de que una separación entre alambres de 5 mm será suficiente para lograr la detección de muones con una resolución aceptable. Con esta separación, la pérdida en resolución en posición del detector es menor al 12%, comparándolo con un detector ideal en que la distancia entre alambres fuera infinitesimal. Al considerar las limitaciones mecánicas y económicas que una separación de este tipo implica, se valida la opción de colocar cada 5 mm los alambres pues estamos hablando de una variación de centímetros. Se consideró también que cada metro de alambre cuesta 1 dólar.

Estas simulaciones toman en cuenta: las dimensiones de la pirámide, la cantidad de masa que debe atravesar un muón al pasar por la pirámide, composición química de los materiales que constituyen la pirámide, la desviación de su trayectoria original producto del choque con las partículas de materia que tienen que atravesar hasta llegar al detector colocado en el túnel y la energía con que llegan los muones a la pirámide, entre otras consideraciones.

Experimentalmente se ha probado que una separación entre cátodos de 5 mm es suficiente para lograr que las líneas del campo eléctrico formadas entre los cátodos sean totalmente paralelas. Esto se comprobó al comparar en el osciloscopio la forma del pulso obtenido, experimentando con varias distancias. Separaciones menores a 3 mm nos resultaron en descargas continuas al llegar a un voltaje de operación menor a 1.5 kV, y al incrementar la separación, la forma de los pulsos fue tomando mejor forma hasta que a pesar de la gran separación, ésta no mejoraba.

De este modo, al contar con unas líneas de campo eléctrico completamente iguales se procura que cuando ocurra la ionización producto del paso del muón por el detector, la mayor contribución de electrones viajen al alambre más cercano al lugar en que ocurrió el evento y en menor proporción sea la contribución a los alambres vecinos.

3.6 Gas

Parte fundamental del detector multialámbrico es el gas con el que será llenado. Ya que el proceso de ionización se presenta en todos los gases incluido el aire, podría no ser tan preocupante la elección del tipo de gas empleado en el detector, de no existir restricciones de operación como son: voltaje de operación, ganancia, buena proporcionalidad, etc. Como no todos los gases presentan el mismo comportamiento en presencia de un campo eléctrico, debemos aprovechar al máximo las características propias de cada uno de ellos para nuestro provecho.

Sabemos que los muones al atravesar el detector chocarán con las moléculas del gas que se encuentre en su interior, y producto de estas interacciones es que el gas resulta ionizado. La

energía requerida para producir pares ión-electrón no es la misma para todos los gases y por tanto, si se aprovecha esta particularidad, se puede tener que la eficiencia del detector sea mayor con un gas que con otro.

A la energía mínima necesaria para generar estos pares ión-electrón se le conoce como W y se define por la ecuación:

$$Wi = \frac{\Delta E}{n_T},$$

donde ΔE representa la energía que la partícula pierde en el gas y n_T el número total de iones o electrones liberados. Valores de energía de ionización para varios gases se muestran en la tabla 2.1. Los pares ión-electrón generados al interior del detector no corresponden únicamente a la ionización que se presenta al paso de los muones, también son generados en una segunda colisión entre las moléculas del gas y los electrones liberados en la primera ionización. Ya que la energía y la velocidad con que chocan los muones con las moléculas del gas son enormes, los electrones liberados en una primera ionización son capaces de ionizar nuevamente otras moléculas de gas, dando origen a lo que se denomina como ionización secundaria. El número total de pares ión-electrón corresponde a la suma de pares provenientes de la ionización primaria y secundaria principalmente.

En presencia de un campo eléctrico, en las cercanías de la superficie de los ánodos (alambres), a unos cuantos radios, se presenta un incremento en la intensidad del campo eléctrico a razón de $\approx 1/r$ siendo "r" el radio del alambre. Debido a este cambio en la intensidad del campo eléctrico es que se originan múltiples ionizaciones, mecanismo que conocemos como el proceso de avalancha.

Los electrones producto de la ionización del gas, se ven afectados por las líneas de campo eléctrico por quienes son conducidos hacia los alambres, en donde el potencial es cero; por otra parte, los iones son atraídos hacia el cátodo. En su recorrido hacia los alambres, los electrones pueden ionizar otras moléculas del gas, ya que la velocidad con que viajan es considerablemente grande debido a su ínfimo tamaño y si se cumple que la energía con que resultaron de la ionización primaria es mayor o igual a la energía de ionización del gas. Estos electrones al acercarse a los ánodos se ven influenciados por el cambio en la intensidad del campo, de modo que comienza un proceso de multiplicación en el que se ioniza una gran cantidad de moléculas, dando como resultado la creación de una avalancha de iones y electrones. Los iones son conducidos hacia los cátodos, mientras que los electrones inmediatamente son colectados por el ánodo en donde ocurrió el proceso de avalancha.

El objetivo de nuestro detector es poder advertir el paso de un muón y ubicar la zona en que atravesó la cámara multialámbrica, y aunque esta cualidad principalmente está relacionada con la separación entre alambres, el empleo de un gas adecuado contribuye favorablemente para la ocurrencia del proceso de avalancha. Por esta razón nos conviene elegir un gas que sea fácilmente ionizable a manera de que la energía con la que el muón choque con las moléculas del gas al interior de la cámara no tenga problemas para ionizar el gas. Es decir,

se tratará de ionizar la mayor cantidad de moléculas del gas por cada colisión que se presente entre ellas y el muón, sacando provecho del proceso de avalancha. Se ha registrado que gases nobles presentan avalancha a menores intensidades de campo eléctrico que en compuestos de gases.

No obstante la gran ventaja que representa la utilización de gases nobles en este tipo de detectores, se tiene una limitante en cuanto la ganancia o el tamaño del pulso que se obtiene una vez ocurrida la ionización. Dependiendo de la intensidad del campo eléctrico aplicado, puede ocurrir que en el proceso de avalancha los pares ión-electrón creados tengan la suficiente energía como para seguir con el proceso de multiplicación, y esto genere una descarga en el detector. En este caso, en vez de resultar benéfico aplicar un campo eléctrico para evitar que los electrones viajen en otra dirección distinta a los ánodos, se tendría un estado de descargas continuas, que no reflejarían en lo absoluto el paso de un muón por el detector.

Los iones en su camino hacia los cátodos pueden recombinarse con moléculas del gas que hayan sido excitadas por el paso del muón, y como consecuencia se formen fotones, que dependiendo de su energía, pueden ionizar otras moléculas del gas. Incluso las moléculas del gas excitado pueden originar fotones. Esto ocurre debido a que la única forma de regresar a su estado base es mediante la emisión de fotones, con energías mínimas de 11.6 eV para el caso del argón. Si se toma en cuenta que la energía de ionización para el cobre que es de 7.7 eV, y generalmente los cátodos son de cobre, es fácil darse cuenta de que si los iones no se han recombinado antes de llegar a los cátodos, entonces reaccionarán con las moléculas del cobre dando como resultado la formación de fotones. Se iniciaría un nuevo proceso de avalancha espuria, muy poco después de la primera e incluso para bajas ganancias, la energía de estos procesos puede ser suficiente para dar origen a un estado de descarga continua.

Como un controlador de fotones se pueden agregar moléculas poli atómicas que tienen comportamientos distintos a los de los gases nobles cuando están excitadas. En vez de regresar a su estado base por medio de procesos radiactivos, lo hacen absorbiendo fotones en un amplio rango de energías. Esta es una propiedad común que presentan la mayoría de los compuestos orgánicos de la familia de los hidrocarburos, y también es posible encontrarla en varios compuestos inorgánicos como el CO₂, BF y otros.

Las cantidades que se pueden emplear de estos gases (llamados "*quencher*" cuando se utiliza su propiedad de absorber fotones), determinarán la ganancia del detector además de modificar el comportamiento del gas noble. El añadir incluso pequeñas cantidades del gas *quencher* permite trabajar en la región de proporcionalidad y obtener una alta ganancia en el detector antes de que ocurra una descarga. Las ganancias que se llegan a tener utilizando estas mezclas de gases son muy superiores a las que se obtendrían utilizando un solo gas. Cuando se trabaja en la región de proporcionalidad se logran factores de multiplicación de hasta el orden de 10⁶, lo que se ve reflejado en la magnitud del proceso de avalancha.

En la figura 20 se muestran las distintas ganancias que se logran obtener en función de los porcentajes del gas *quencher* en la mezcla [13]. Se debe tomar en cuenta que aunque se utilice el mismo porcentaje de mezcla en los gases que se prueban, los resultados serán

distintos, pues la combinación resultante de cada mezcla tendrá un comportamiento independiente.

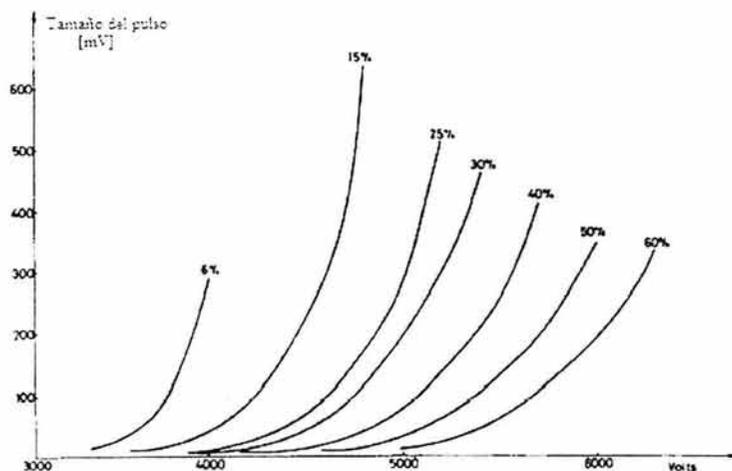


Figura 20. Tamaño de los pulsos en función de la mezcla de CO₂ Ar utilizada para una separación entre alambres de 2mm y distancia entre cátodos de 8mm. La proporción que varía es la de CO₂.

Para garantizar que la ganancia sea constante durante el tiempo de operación del detector, las características del gas deben mantenerse en un estado óptimo, por lo que es conveniente que el suministro del gas al detector sea constante a modo de tener en su interior, una mezcla de gas lo más pura posible.

La elección del tipo de gas que se utilizará en el detector está determinado primordialmente por la aplicación a que se refiera, en nuestro caso, podemos sacrificar los bajos niveles de energía de ionización que poseen gases como el xenón o el criptón por un nivel un poco más alto como el del argón que empero se adquiere a un bajo precio. Para resolver los problemas de descargas, utilizaremos el CO₂ que quizás no sea tan eficiente como el metano, pero que sí se encuentra disponible en el mercado en una mezcla con argón, siendo fácil de conseguir y de precio accesible. Una ventaja que representa el CO₂ sobre el metano, es que el metano es inflamable, mientras el CO₂ no lo es. Pensando en que el sistema de detección se colocará bajo la pirámide, el reducir el riesgo de una explosión por la acumulación de metano en el túnel, resulta muy atractivo para el proyecto.

4. Construcción

Cada factor tomado en cuenta durante la construcción del detector repercutirá en su funcionamiento, por lo que se tuvo especial cuidado en este proceso para lograr un óptimo comportamiento del detector. A continuación se detallan las condiciones en que el detector fue armado, así como las consideraciones realizadas para el empleo de ciertos materiales.

4.1 Selección de materia prima.

Alambre

El tener alambres de diámetros grandes implica una mayor afectación al campo eléctrico y hace mucho más difícil la tarea de tenerlos en un mismo plano. Sin embargo, el empleo de alambres de diámetros muy pequeños admite imperfecciones que se puedan dar al momento de colocarlos en el mismo plano. Es evidente que con un menor tamaño de alambres, se afectarían muy poco las líneas de campo eléctrico. Por este lado, la limitante se vuelve la tensión mecánica que pueda soportar un alambre delgado, necesaria para eliminar en medida de lo posible la aparición de una catenaria.

La compañía *California Fine Wire Company* se especializa en la fabricación de alambres de diámetros verdaderamente pequeños. Fabrica alambres de distintos materiales y para aplicaciones tan variadas, como la de los detectores de partículas que nosotros construiremos.

Esta empresa garantiza que el proceso ultra fino con el que trabajan los alambres da como resultado alambres totalmente lisos, libres de defectos y con diámetro constante. La tolerancia que manejan tanto para el diámetro como para la redondez es de 0.1 micras. Los alambres disponibles para esta aplicación se muestran en la tabla 4.1.

Los experimentos que se han realizado hasta ahora en el Instituto de Física de la UNAM en cuanto a detectores multialámbricos se refiere, muestran por experiencia que el alambre que mejor se pega a nuestras necesidades es el de tungsteno chapado con oro, por lo que se sometió a pruebas de tensión, manejabilidad y soldadura junto con otros dos tipos de alambre. Los alambres utilizados en las pruebas y sus resultados se muestran en la tabla 4.2, siendo el de tungsteno de 25 micras el que mejor respondió a estas pruebas.

La manejabilidad de este tipo de alambres resulta de especial importancia pues se debe considerar que debido a su diámetro, es muy fácil maltratarlos al maniobrarlos. Hemos comprobado que si accidentalmente se llegase a doblar, la estría formada no se logra eliminar a pesar de tratar de corregirla manualmente. El aspecto del alambre después de doblarse es como el que se muestra en la figura 21.

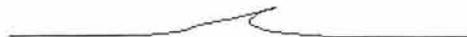


Figura 21. Representación microscópica de un doblez en el alambre.

La forma en que se recibe el alambre de fábrica es en carrete. Por tratarse de alambres tan finos, cada cierto número de vueltas el fabricante aplica una ligera cantidad de laca sobre una línea del carrete, con la finalidad de evitar que el alambre se esponje al momento de irlo desenredando. Esta línea de pegamento es la que representa el mayor peligro cuando se desenreda el alambre, pues si no se despega con sumo cuidado el alambre del resto del carrete, es cuando se produce el doblez. También se consideró que la forma en que se soldarán los alambres debe ser tal, que no maltrate el alambre en medida de lo posible.

ALAMBRE	NOMBRE COMERCIAL
Tungsteno Chapado de Oro	Stablohm 800b (resistance wire)
Aluminio Chapado de Oro	Stablohm 675 (resistance wire)
Cobre de 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 4.1 Alambres recomendados para la construcción de detectores multialámbricos.

Como hemos mencionado, el ánodo será formado por una serie de alambres paralelos colocados cada uno a una misma distancia y en un mismo plano, pero no se ha hecho hincapié en la forma en que se sujetarán todos estos alambres al ánodo. La configuración mecánica del detector es la de un sándwich, en donde el ánodo corresponde a la capa que irá en medio. En un marco se colocará en sus extremos un circuito impreso al cual irán soldados los alambres, y los circuitos integrados de las líneas de retraso. Este marco está pensado a manera de que tanto los alambres como los circuitos impresos como el propio marco, ocupen el mismo plano, y que tanto la distancia entre el cátodo superior y el inferior, sea la misma hacia el ánodo.

Las pruebas de soldadura consistieron en comprobar la respuesta de los alambres a la soldadura, la temperatura utilizada en el caudín y el tipo de soldadura. No todos los alambres presentaron la misma respuesta a la soldadura, por ejemplo, a pesar de su buena resistencia mecánica, los alambres de molibdeno chapado de oro y el de titanio chapado de oro no son fáciles de soldar y cuando se consigue, con un ligero jalón el alambre se suelta de la soldadura dejando un túnel en ella. Por otra parte, la temperatura utilizada para soldar

los alambres no puede ser demasiado elevada porque el alambre se quema y una vez que esto ocurre, con un ligero jalón el alambre sale de la soldadura sin su recubrimiento de oro en la zona en que se aplicó el calor excesivo.

ALAMBRE	MÁXIMA TENSIÓN SOPORTADA [N]	RESPUESTA A LA SOLDADURA
Molibdeno Chapado de Oro 25 μ	1.08	Mala
Tungsteno Chapado de Oro 20 μ	0.95	Buena
Tungsteno Chapado de Oro 25 μ	1.16	Buena
Tungsteno Chapado de Oro 50 μ	1.35	Regular
Titanio Chapado de Oro 20 μ	1.11	Mala

Tabla 4.2 Resultado de los alambres propuestos para la construcción del detector.

Tomando en cuenta las características de cada alambre probado, llegamos a la elección del alambre de Tungsteno chapado de oro por ser el que mejor se adecuó a nuestras necesidades. Con este alambre es relativamente fácil la soldadura al circuito impreso, presenta una buena resistencia mecánica y, aunque es un poco delicado al momento de sacarlo de su carrete, si se hace con cuidado no se tienen mayores problemas para manejarlo. El alambre se muestra en la figura 22.

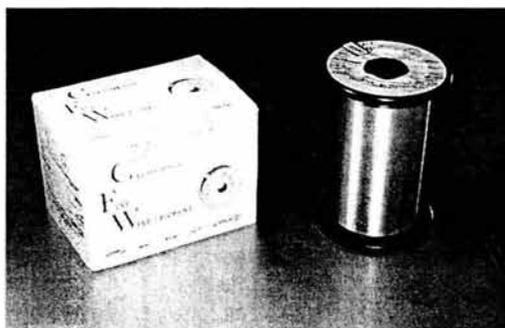


Figura 22. Alambre de tungsteno chapado de oro de 25 μ m.

En cuanto a la soldadura también se realizaron pruebas con los tipos de soldadura que comercialmente se pueden hallar en el país. Encontramos que la soldadura 60/40 SnPb (60% estaño y 40% plomo) es la que menor punto de fusión tiene siendo éste de 190°C, a la vez que su costo es realmente bajo. Por otro lado, la soldadura SnAg3.5 que tiene un 3.5%

de plata y el resto de estaño, tiene un punto de fusión de 221°C, pero su precio es considerablemente elevado debido a la cantidad de plata que posee.

Por tener el menor punto de fusión y un precio muy por debajo de la soldadura de plata, es que elegimos la soldadura 60/40 de estaño/plomo. Estamos conscientes de que los vapores que despiden esta soldadura son muy dañinos y de que no es de la mejor calidad, sin embargo, el precio tan elevado de la soldadura de estaño/plata no justifica su empleo.

MATERIAL	VENTAJA	DESVENTAJA
Madera	Fácil de trabajar Resistente a impactos	Deformación con la humedad Se vende en tamaños reducidos Pesada Poco práctica
Triplay	Fácil de trabajar Disponible en varios tamaños y espesores Bajo precio Resistente a impactos	Deformación con la humedad Pesado
Mylar	Fácil de trabajar Resistente a la humedad Resistente a la deformación Ligero	Difícil de conseguir en el país en tamaños grandes. Precio elevado
Acrílico	Fácil de trabajar Disponible en varios tamaños y espesores Transparente Resistente a la humedad Ligero	Deformación en grandes áreas y por calor Precio un poco elevado Quebradizo
Policarbonato	Muy resistente a impactos Resistente a la humedad Disponible en varios tamaños y espesores Fácil de trabajar	Precio elevado Deformación en grandes áreas
Acero Inoxidable	Muy resistente a impactos No se deforma Resistente a la humedad Disponible en varios tamaños y espesores	Precio muy elevado Muy pesado Difícil de trabajar
Aluminio	Disponible en varios tamaños y espesores Resistente a la humedad Resistente a impactos Fácil de trabajar Ligero	Se llega a deformar en grandes áreas Precio un poco elevado

Tabla 4.3 Comparación entre los materiales que pueden emplearse para la construcción del contenedor.

Aluminio

De los materiales que pudiesen conformar el contenedor de nuestro detector, son unos cuantos los que cumplen con las limitantes de diseño ya establecidas. En la tabla 4.3 se hace referencia a tales materiales así como a sus ventajas y desventajas.

El material que se ha contemplado a ser usado para el contenedor del detector será aluminio. Ya que se requiere una estructura rígida e inmune a la humedad, de los diversos materiales de los que se podría construir el contenedor sólo el aluminio presenta una opción viable al momento de consultar la disponibilidad de otros materiales como nylamid. De todos los metales a excepción del hierro, el aluminio es el más económico. Además tiene la ventaja de ser ligero, pues pesa una tercera parte del hierro, el latón o el cobre. No es venenoso y es anticorrosivo, también es resistente a la acción de sustancias químicas. Otra ventaja adicional que presenta el uso de aluminio es que en el Taller del IFUNAM existe la herramienta necesaria para poder maquinarlo, evitando costos adicionales de maquinado.

El aluminio elegido es de una especificación conocida comercialmente como T5. Se caracteriza por tener una gran resistencia mecánica, aspecto importante para evitar una deformación en la estructura, garantizando a la vez, una tensión uniforme en los alambres. Estimamos que este material no tendrá problemas al momento de escalar el prototipo al tamaño real.

Se ha pensado que la estructura del contenedor tenga la forma de un rompecabezas, en el cual la unión de una pieza con la otra le añade rigidez al contenedor. Esta configuración soluciona el problema que representaba el maquinar una pieza de dimensiones de 1m. Por lo tanto, el resultado es el que se muestra en la figura 23. El espesor de las piezas utilizadas para el marco será de $\frac{1}{2}$ ". mientras que para las tapas se usará aluminio de $\frac{1}{4}$ ".

FR4

Existen tres materiales utilizados comúnmente en la elaboración de circuitos impresos, cada uno de ellos con características de calidad diferentes y de acuerdo con la aplicación es que unos representan una mayor ventaja ante otros. El material que necesitamos debe cumplir con altos estándares de calidad ya que a este circuito impreso irán soldados los alambres que conforman el ánodo de nuestro detector. Es importante que cada alambre tenga el suficiente apoyo en el circuito impreso para que, una vez soldado, se mantenga en su lugar por el espacio de tiempo que dure la medición bajo la pirámide.

Ya conocemos el tipo de soldadura que emplearemos, por lo que nuestro circuito impreso no sólo debe resistir el calor aplicado durante el proceso de soldadura, sino que también deberá resistir la tensión mecánica aplicada por los alambres. La adhesión de las pistas de cobre a su base no puede verse afectada por aplicación de calor, lo que puede ocurrir al reponer un alambre roto o dañado, o en caso de que el alambre no haya sido bien colocado o lo soldadura no haya sido buena. Esto implica un calentamiento excesivo hacia el material.

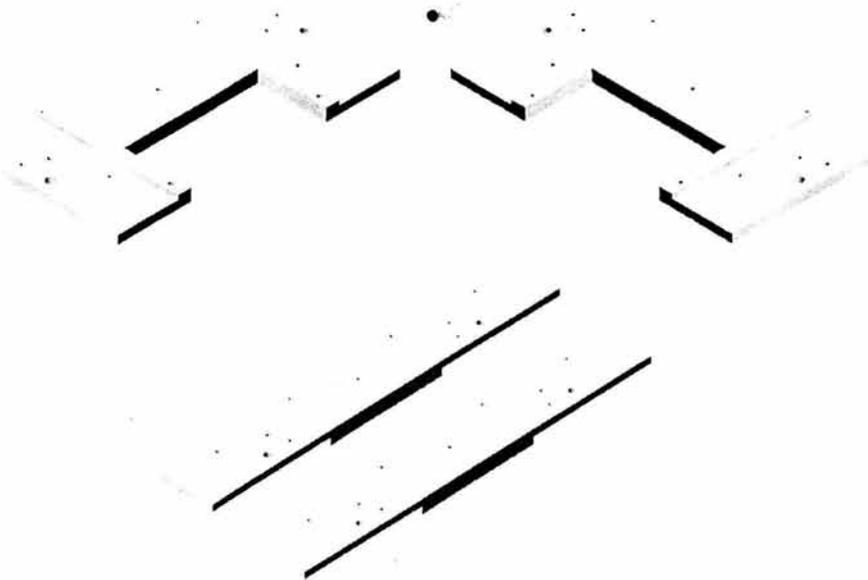


Figura 23. Piezas de aluminio que conforman el marco del contenedor.

En la tabla 4.4 se muestran los nombres de estos materiales así como sus principales características. La única opción que podemos tomar es el FR4 ya que 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 aplica con el cautín (alrededor de 600°F). Su rigidez es también muy buena por tener capas de fibra de vidrio perpendiculares unas a otras de manera que junto con la capa de cobre al llegar al espesor de $\frac{1}{16}$ " el material tiene una muy buena resistencia mecánica.

El precio del FR4 a comparación del resto sí se puede considerar elevado, no obstante los beneficios que brinda son mayores. Este material también se utilizará para los cátodos, que en sí son dos placas metálicas paralelas separadas una cierta distancia, a las cuales se aplica alto voltaje.

Aunque estos son los materiales más comerciales en nuestro país, se puede encontrar mayor información acerca de estos y otros materiales en la referencia [18].

NOMBRE	MATERIAL	RESISTENCIA MECÁNICA	RESISTENCIA AL CALOR	CALIDAD	CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS	PRECIO
FR4	Fibra de vidrio	Buena	Excelente	Excelente	Fibra de vidrio tejida con resina epoxi ¹⁴ .	Elevado
FR3	Baquelita	Regular	Regular	Buena	Papel prensado con resina epoxi.	Regular
FR2	Cartón	Mala	Regular	Regular	Papel prensado.	Bajo

Tabla 4.4 Materiales comúnmente empleados para la elaboración de circuitos impresos.

Gas

De los gases nobles, el más económico y que presenta buenas condiciones para la generación de pares ión-electrón es el Argón. Por otra parte, de los gases orgánicos los que mejores resultados proporcionan [19, 20], son el Metano, Isobutano y Propano. Desafortunadamente, estos gases son difíciles de conseguir en el país pues los tiempos en que se entregan son demasiado extensos (12 semanas) y junto con su alto costo se vuelven una opción poco viable. Sin embargo, se han obtenido buenos resultados con el bióxido de carbono, a pesar de ser un gas inorgánico. La cantidad de cada uno de estos dos gases en la mezcla, determina la cantidad de pares ión-electrón creados al momento de la ionización.

De manera experimental [13] se ha encontrado que la mezcla de CO₂ Ar (20%, 80%) y el gas conocido como P-10 se comportan de manera adecuada cuando se les emplea en detectores multilámbricos [12]. En la tabla 4.5 se muestra la información proporcionada por la empresa INFRA para estos dos gases. El tiempo de entrega es de 15 días y por tratarse de la UNAM, los cilindros se prestan y no se cobra el servicio de entrega.

Cabe recordar que el detector está pensado para operar las 24 horas del día durante un lapso aproximado de un año. Mientras el detector esté operando, el flujo de gas en su interior será constante, estimamos que un tanque en esas condiciones de trabajo dure aproximadamente de 3 a 6 meses. El emplear mezclas de gas costosas y de difícil disponibilidad, se contraponen con las condiciones de trabajo que requerimos.

Una vez que se agote el gas de los cilindros, el sistema de monitoreo instalado junto al detector enviará un aviso a la computadora que de manera remota la vigilará desde el IFUNAM en C. U. Los encargados del mantenimiento del detector sabrán que es momento de cambiar el tanque de gas por uno nuevo. Las mediciones obtenidas a partir de ese momento disminuirían gradualmente, mientras que el gas restante al interior del detector se agotara. En el momento en que los iones del gas fueran totalmente recombinados las mediciones registradas prácticamente disminuirían a cero, pues la calibración de la cámara

¹⁴ Tipo de resina sintética, dura y resistente, utilizada en la fabricación de plásticos, pegamentos, etc.

fue hecha considerando la existencia de un medio fácilmente ionizable. Los registros que se lograran obtener en dado caso se deberán a una radiación sumamente energética, capaz de ionizar el aire empobrecido de iones que se encontrase en el detector. No obstante esta disminución en el registro de eventos, una vez reemplazado el gas, el conteo seguiría de la manera esperada y comparado con las mediciones realizadas durante meses, la disminución de un día no resulta significativa.



<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio Venta</i>
P10	<p>MEZCLA CERTIFICADA:</p> <p>METANO 10 % / ARGON 90 %</p> <p>Contenido en un cilindro de acero al carbón recargable modelo "B".</p> <p>Presión: 2000 psig Válvula: CGA-350 Contenido: 6 m³.</p>	<p>\$2,040.00</p> <p>CARGA</p> <p>+ 15% IVA</p>
CO ₂ Ar	<p>MEZCLA CERTIFICADA: WELDER C-2</p> <p>CO2 20 % / ARGON 80 %</p> <p>Contenido en un cilindro de acero al carbón recargable modelo "B".</p> <p>Presión: 2000 psig Válvula: CGA-350 Contenido: 6 m³.</p>	<p>\$1,030.00</p> <p>CARGA</p> <p>+ 15% IVA</p>

Tabla 4.5 Características de los gases CO₂Ar y P10.

4.2 Selección de herramienta.

Para la construcción del contenedor será necesario una máquina que con la mayor precisión posible se apegue a las dimensiones de diseño, por lo tanto, el empleo de una máquina de control numérico es la mejor opción. El Taller de Manufactura del Instituto de Física de la UNAM cuenta con una máquina de este tipo, está a cargo del Ing. Ricardo Ramírez Jiménez y él es quien nos apoyará para la construcción del contenedor. Las ventajas que representa utilizar este tipo de máquinas es que una vez que se tienen los planos de la pieza a construir, se programa la máquina con dichas medidas y se espera a que comience el

maquinado de la pieza. Una vez terminada la pieza ya no es necesario hacerle modificación alguna, si es que en los planos se incluyeron todas las indicaciones. Gracias a la exactitud de la máquina, las piezas tendrán las medidas exactas a como se indicaron en los planos.

Por otra parte, el proceso químico mediante el cual se realizan los circuitos impresos siempre involucran un ataque químico hacia el cobre. Considerando que en estos ataques químicos aunque se protejan las pistas del circuito seguramente recibirán parte de este ataque. Por ello se buscó un método alternativo para elaborar el circuito, puesto que por mínimo que sea el desgaste en las pistas, al momento de soldar los alambres, ya no tendrán la misma cantidad de cobre de soporte, incrementando la posibilidad de tener el desprendimiento de las pistas cuando se aplique la tensión y el calor.

En el departamento de Electrónica del IFUNAM se cuenta con una máquina de reciente adquisición, que a semejanza de una fresadora, realiza circuitos impresos. Hasta ahora no había sido utilizada y no hay personal a cargo, por lo que pude aprender a manejarla y realizar el circuito impreso que requerimos.

La máquina es de la compañía alemana *LPKF Electronics* y el modelo es el *Protomat C60*, utiliza el software *Circuit CAM 4.0* que funge como interfaz entre el software de diseño del circuito impreso y el software *Board Master* quien controla la máquina. La resolución de esta máquina es de decenas de micras, lo que es muy conveniente para nuestro detector, pues se garantizará que la distancia entre alambres sea constante. Asimismo representa una ventaja al momento de armar el dispositivo, puesto que al respetar las dimensiones del diseño no se tendrán problemas al ensamblar las piezas.

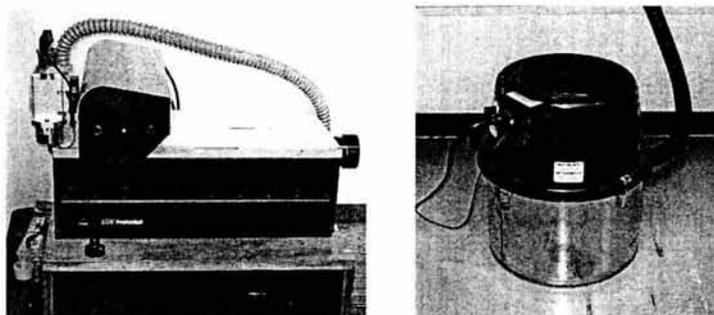


Figura 24. Protomat C60 y su aspiradora.

A manera de una fresadora, el cabezal de la máquina con la herramienta adecuada, va ranurando el FR4 hasta terminar de marcar las pistas del circuito, a la vez que la aspiradora de la máquina succiona el polvo que se genera al momento del desbaste. En la figura 24 se presenta la imagen de la máquina y su aspiradora.

El cautín con el que se soldarán los alambres al ánodo es una estación de trabajo *Weller* modelo *WES50* de 50 W con control de temperatura variable entre 350 y 850° F. Este cautín con una punta tipo PES50 son los que se utilizarán, pues hemos probado que con puntas más delgadas se tienen problemas al soldar los alambres, pues no resulta suficiente el calor para derretir la soldadura. Con puntas delgadas se hace necesario incrementar la temperatura del cautín y como consecuencia, se “quema” el alambre.

4.3 Elaboración del contenedor.

Para poder llevar a cabo la fabricación de un contenedor como el que requerimos, fue necesario elaborar los planos de cada una de sus piezas, para lo cual utilizamos el software *Autocad*. Con la precisión que brinda este software en la realización de los planos, se busca tener un contenedor cuya tolerancia al error sea del orden de décimas de milímetro. Las piezas del contenedor vistas en *Autocad* se muestran en la figura 25. En el Apéndice 2 se pueden consultar los planos del detector.

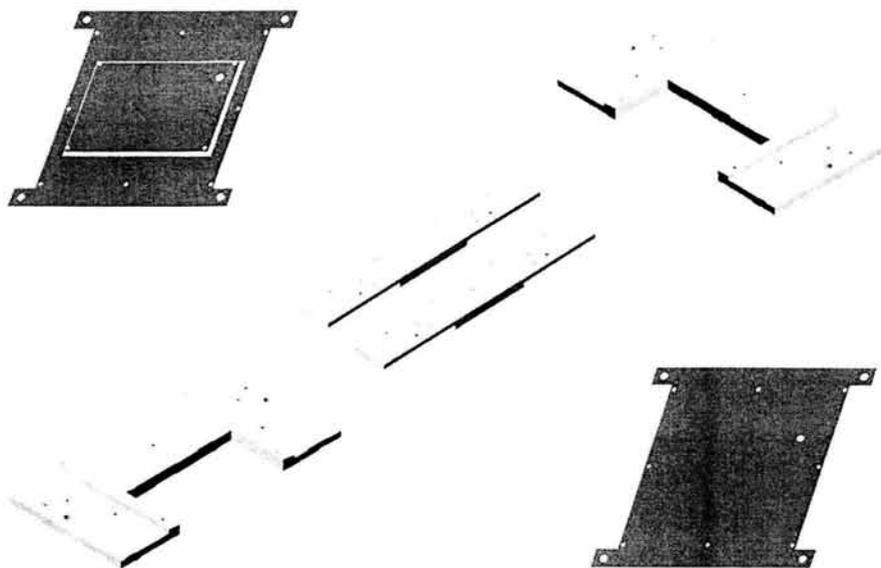


Figura 25. Vista en 3 dimensiones de las piezas que conforman el detector.

De las seis piezas que conforman el contenedor, cuatro corresponden al marco en que se colocarán los alambres y las líneas de retraso, y las otras dos piezas, son las tapas de la cámara multialámbrica. Una de estas tapas tiene una rendija para efectos de calibración del

detector, por lo que una vez que se haya calibrado y acondicionado, esta tapa puede ser sustituida por otra que no tenga dicha ranura.

Para la entrada y salida del gas se tienen dos orificios, uno en cada tapa, dispuestos de forma tal que el gas se vea forzado a cubrir la mayor área posible en su camino hacia el orificio de salida. En una de las tapas irá incrustado un cátodo, mientras el otro solamente irá pegado a la otra tapa, por ello es que se aprecia un hueco en una de las tapas.

Puesto que la separación entre cátodos y a su vez la distancia entre ánodo y cátodos debe ser exactamente la misma si se quiere un óptimo funcionamiento del detector, es que se reconoce lo valioso de maquinar las piezas en una máquina con tales características. Si hubiesen sido maquinadas en un torno de forma manual, los errores humanos que se presentarían por ejemplo, al momento de perforar los orificios, si el ángulo con que se hiciesen los orificios de una pieza no fuese exactamente el mismo que con el resto de las piezas, se tendría un problema al momento de ensamblar las piezas, pues los orificios en donde van los tornillos no coincidirían, presentándose los primeros problemas. Pero es aun más grave el que los espesores de las piezas no sean los mismos, porque esto se traduciría en separaciones desiguales entre cátodos, por lo que el campo eléctrico no sería uniforme, pudiendo quedar más cercano un cátodo al ánodo y provocando descargas eléctricas a bajos voltajes, no permitiendo llegar a la región de proporcionalidad en donde debe trabajar el detector.

4.4 Elaboración del circuito impreso.

Teniendo en mente las dimensiones del área activa de nuestro detector, es que se fijan las dimensiones del circuito impreso. Para realizar el circuito impreso utilizamos el software Protel DXP simplemente por estar familiarizado con él.

El trazado del circuito impreso quedó como se muestra en la figura 26, aunque se trate de un circuito de una sola cara, para que el diseño sea correcto, se debe dibujar el circuito como "*bottom layer*". Las dimensiones del "*keep out layer*" corresponden a los límites de nuestro circuito, y es en esta línea en donde irá el corte del circuito del resto de la placa de material. Se puede observar que en cada circuito impreso se tienen seis pistas conectadas a tierra física. A los alambres que van soldados a esas pistas les llamamos *alambres de guarda* y tienen la función de proteger la estructura del detector de las líneas de campo eléctrico, ya que en caso de que se presentara una descarga hacia la estructura, la descarga se daría en los *alambres de guarda* y no en la estructura. El grosor de los alambres de guarda es de al menos el doble de los alambres que van a la *línea de retraso*, esto con la finalidad de que sean capaces de conducir una mayor cantidad de corriente eléctrica.

Protel DXP permite trabajar con distancias y tamaños realmente minúsculos. Las distancias que se dibujan y las que se miden una vez terminado el circuito impreso, tienen variaciones menores al 0.1%. Por lo tanto, si empleamos esta característica de Protel, podemos tener una plantilla de referencia que nos permita colocar los alambres a una misma separación. En ambos circuitos se puede observar que de cada pad sale una línea delgada. Esta será la

guía al momento de colocar los alambres, solamente se deberá alinear el alambre con respecto a dicha línea y acto seguido se suelda el alambre al circuito.

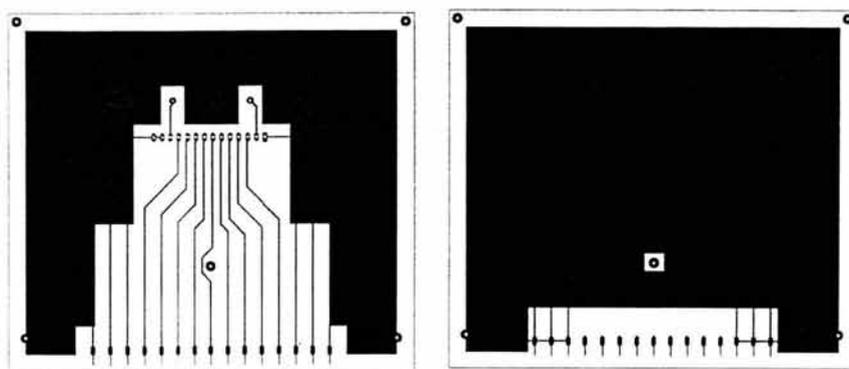


Figura 26. Dibujo del circuito impreso desde *Protel DXP*.

Una vez que se tiene dibujado el circuito en cualquier software para este fin, se debe obtener el *gerber*¹⁵ del circuito para poder acondicionarlo en *Circuit Cam 4.0* y después comenzar a trabajar el impreso con *Board Master*. En *Circuit Cam* se asignan acciones como: la remoción de cobre entre pistas, la herramienta que se utilizará en cada paso del proceso, si se cortará el circuito del resto del material, entre otras. *Board Master* es el software con el cual manejamos la máquina. En este software vamos guiando paso a paso la elaboración del circuito, es la interfaz entre el operador y la máquina. Si se requiere, en el Apéndice 3 se encuentra un breve manual que enseña a detalle los pasos necesarios para realizar un circuito impreso utilizando la *Protomat C60*.

En caso de que se requiera, también se puede interrumpir el maquinado y reanudarlo posteriormente sin que la máquina sufra descalibración, por lo que se garantiza la elaboración de un circuito de forma pausada. Incluso la interrupción puede durar días incluyendo el apagado de la máquina. La condición necesaria para lograr un buen circuito impreso una vez que se ha interrumpido en algún punto la elaboración del circuito, es que se introduzcan los archivos correctamente a la máquina y utilizando las mismas coordenadas que se manejaron desde un principio.

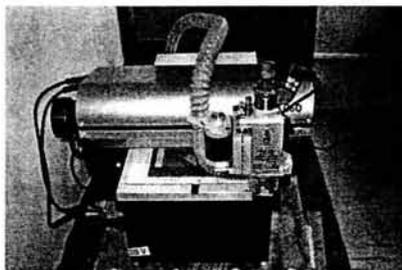
Ya trabajando con la *Protomat* desde *Board Master*, es posible controlar factores como la profundidad de los surcos que conforman las pistas, y la calidad de los mismos, pues

¹⁵ Se le llama *gerber* a los archivos que contienen la información gráfica del circuito impreso en formato numérico, por lo que pueden ser interpretados por cualquier máquina de tipo CAM.

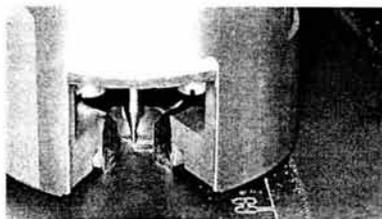
después de cierto tiempo de trabajo la herramienta sufre desgaste y hay que reponerla para conservar la calidad del circuito.

En la figura 27 se puede apreciar el proceso de maquinado del circuito impreso en la *Protomat C60*. Con ayuda de un microscopio de aumento 50x, se lograron captar las imágenes correspondientes a una pista y a un pad en donde se soldarán los alambres. En la figura 28 se observa que el pad queda totalmente aislado del resto del circuito, pero en esta forma de hacer circuitos impresos podemos observar que la capa de cobre de $38\mu\text{m}$ de espesor se mantiene intacta. El hecho de que el cobre en donde se soldarán los alambres no sea atacado químicamente representa una ventaja mecánica, porque no se afecta el espesor del cobre y así, una vez aplicada la soldadura, los alambres tendrán una mayor área de apoyo.

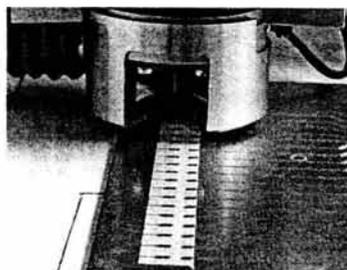
Se realizaron pruebas de soldadura en circuitos impresos elaborados mediante procesos fotosensibles, y al compararlo con el método de desbaste se puede observar en la figura 29 que existe una gran diferencia en cuanto a la calidad de los circuitos. Es posible observar que las líneas con que se alinean los alambres no son uniformes cuando el circuito se realiza con métodos fotosensibles, mientras que para la misma parte del circuito realizado por el método mecánico las líneas son perfectamente iguales.



a)



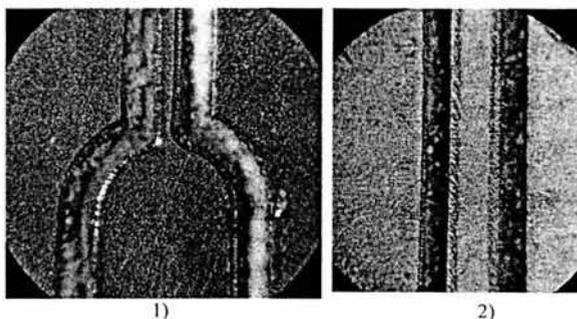
b)



c)

Figura 27. a) Con la máquina Protomat C60 es posible fabricar circuitos impresos sin atacar químicamente la superficie de cobre. b) Una broca muy fina es la que se encarga de desbastar el material, definiendo así, las pistas del circuito. c) En el trabajo realizado en FR3, es fácil apreciar que la forma en que queda el circuito es de una excelente calidad.

Figura 28. En la imagen 1) observamos con ayuda de un microscopio la forma en que queda el pad, posteriormente se remueve el cobre que lo rodea. 2) Forma en que queda una pista.



Para el caso de los cátodos no es necesario utilizar la máquina, ya que en sí, un cátodo es únicamente una placa metálica a la que se aplica voltaje. Las medidas de los cátodos son 10 x 14 cm, teniendo cobre solamente un área de 9 x 9 cm. Aunque el área activa está pensada que sea de 10 x 10 cm el tamaño de los cátodos es menor, para prevenir posibles descargas entre los cátodos y el marco de aluminio que soporta al ánodo. La forma en que se removió el exceso de cobre fue manual, primero cortamos con una navaja el área de 9 x 9 cm y después con el cautín a la máxima temperatura calentamos el cobre y lo despegamos con mucho cuidado de la tableta.

Una vez que se terminan de maquinar los circuitos impresos es momento de limpiarlos y eliminar cualquier residuo que quede en ellos. Para esto, los circuitos se lavan con una solución jabonosa y una fibra especial a modo de eliminar cualquier impureza del circuito, así como los residuos de las rebabas de metal que pudiesen quedar entre las pistas y pads.

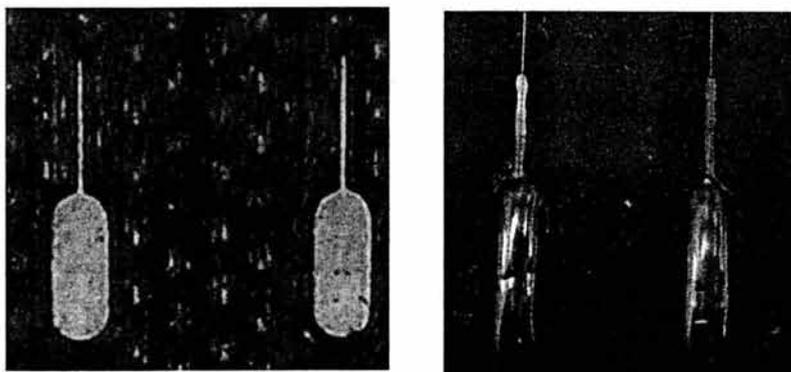


Figura 29. A la izquierda se observan pads perfectamente iguales, mientras que a la derecha notamos que las líneas de alineación no son uniformes. El circuito de la derecha fue realizado por un método fotosensible.

4.5 Armado de la cámara.

De nada sirve tener una mezcla de gas tal que se obtenga el mayor tamaño de pulsos sin que existan descargas en el detector, ni que la superficie de los cátodos sea completamente lisa, ni que la separación entre cátodos y ánodo sea exactamente la misma en todos los puntos, si al interior del detector existe polvo o basuras que harán exactamente lo contrario a lo que se buscaba con los parámetros citados.

Esta basura podría afectar el voltaje de operación provocando descargas en el detector antes de llegar a la región de proporcionalidad, por ello se designó un área especial de trabajo pensando en evitar lo más posible la contaminación de nuestro detector. En la figura 30 aparece la que llamamos “área limpia” y es donde armamos nuestro detector.

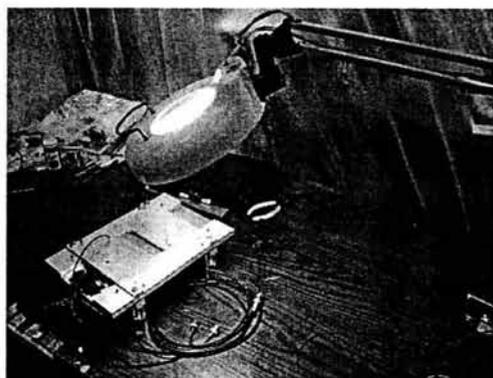


Figura 30. Área de trabajo. Está cubierta por plástico de piso a techo, a modo de evitar la intromisión de polvo al interior del detector.

Todas las piezas fueron lavadas con una solución jabonosa y secadas con aire a presión, para evitar la pelusa que se acumularía al secarlas con un trapo. Las herramientas también fueron limpiadas de la pelusa con aire a presión. Se procuró que cualquier cosa que entrara al área limpia, lo hiciera libre de polvo o pelusa.

Antes de comenzar con el ensamblaje de las piezas nos aseguramos de que todas las piezas embonaran una con otra perfectamente, así descartamos la posibilidad de que una vez que termináramos de armar la cámara nos percatáramos de algún detalle que no se pudiera corregir fácilmente. Cuando verificamos que no había errores de diseño en las piezas y todas se acoplaban muy bien, comenzamos con el armado de los cátodos.

En una esquina de los cátodos se soldaron los cables que llevarán el alto voltaje, se soldaron de tal forma que la deformación de la superficie de cobre fuese minúscula. Para evitar la deformación del campo eléctrico en esta zona, se aplicó una pintura aislante que soporta más de 3000 V sobre el punto de soldadura y también se cubrió con una cinta aislante especial todo el contorno de los cátodos, dejando dentro de la zona protegida el punto en que se soldó el cable de alto voltaje. El cable utilizado en esta conexión es el RG174/0 que soporta hasta 5000 V. Por otra parte, el cable utilizado para la conexión a la fuente de alto voltaje es de especificación RG59B que soporta hasta 3500 V. El extremo del cable RG59B que se conecta a la fuente de alto voltaje lo hace por medio de un conector de alto voltaje de tipo BNC SHV (ver figura 31).

Aunque la fuente de voltaje utilizada para suministrar el alto voltaje a los cátodos en teoría suministra una corriente máxima de 2.5 mA, se colocó una resistencia de seguridad de 4 M Ω , entre los conectores BNC SHV y los cátodos, para limitar la corriente. Los 4 M Ω se deben a que el voltaje de operación estimado será de 2500 V, y queremos limitar la corriente de la fuente a por lo menos 0.7 mA; utilizando la ley de Ohm comprobamos que el valor de 4 M Ω satisface la condición. La conexión de alto voltaje a los cátodos se hizo con un cable RG174/0 que es de tipo coaxial, siendo mucho menor en tamaño que el RG59B, pero que soporta 1500 V más que el primero. Cada cátodo se conectó a un cable RG174/0 y éstos a su vez, se conectaron en serie con la resistencia de 4 M Ω y en el otro extremo al cable RG59B.



Figura 31. Cables RG59B con conectores de tipo BNC SHV.

Se utilizan dos tipos de cable porque uno presenta mayor facilidad de manejo que el otro, siendo el RG174/0 apto para conectarse en espacios reducidos como los que se presentan en las tapas del contenedor (ver figura 32), mientras que el otro cable es el indicado para trabajar fuera del detector, y darle un uso un poco más rudo.

El cátodo que quedó situado en la tapa que tiene un hueco, fue colocado de forma que la superficie del cátodo coincide con la superficie de la tapa, es decir, el cátodo está en el mismo plano que la cara interna de la tapa. Esta será la tapa inferior. El otro cátodo se colocó directamente sobre la tapa que tiene la ventana ya con su acetato pegado. Como usaremos esta ventana para efectos de calibración, esta será la tapa superior.

En ambos cátodos la colocación de esta cinta aislante llamada *kapton* se hizo procurando que el área de cobre de los cátodos fuese la misma. El *kapton* es una cinta adhesiva translúcida color ámbar que soporta hasta 8 kV y es muy recurrido en la construcción de detectores de ionización porque su pegamento no emana gases nocivos para los detectores. Los tornillos que sujetan al cátodo con la estructura, son cubiertos con cinta de aislar y encima se puso cinta "mágica" para evitar aún más, el posible efecto negativo que generase el alto voltaje en el cátodo de la tapa superior sobre ellos.

Los cátodos van atornillados a las tapas para poder verificar en cualquier momento si no existe falla en ellos o para poder cambiarlos fácilmente en caso de que una descarga los llegue a dañar. También facilita la colocación de los conectores para el gas. Estos conectores tipo NPT para entrada de gas, evitan fugas de gas entre las uniones de las mangueras que lo llevan. Para colocarlos, en cada tapa se pegó con silicón un trozo de manguera de ¼" en el orificio correspondiente. Una vez fija la manguera, se le pusieron codos NPT. Para contrarrestar los efectos del silicón en el gas, las tapas se dejaron orear por tres días antes de cerrar el contenedor. El cátodo completo se observa en la figura 33.

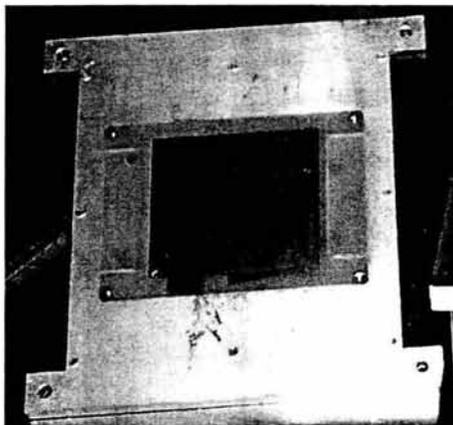


Figura 32. Tapa inferior del detector, se muestra que entre el cátodo y la tapa de aluminio se hace la conexión del cable de alto voltaje.

A la tapa que tiene una ventana se le puso una acetato del tamaño de la ventana, se pegó con una resina epóxica cuyas características químicas no contaminan el gas al interior del detector. Una forma fácil de identificar los pegamentos que son nocivos para el detector, es identificar si al aplicarlos su aroma nos es perceptible. El silicón por ejemplo, contiene clorhidros que afectan severamente al gas y es muy fácil percibir un aroma acético cuando se aplica.

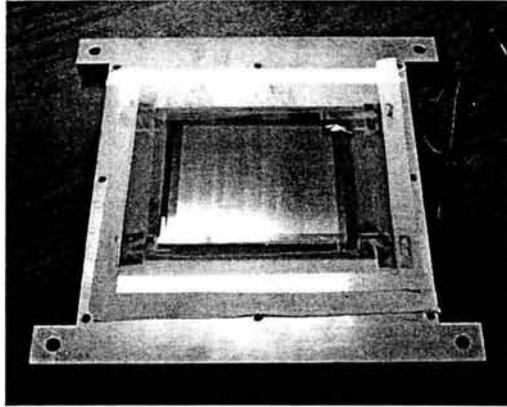


Figura 33. Tapa terminada. Los cátodos van montados en las tapas.

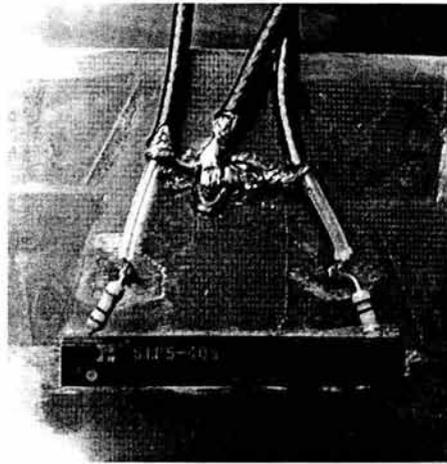


Figura 34. Resistencias de acoplamiento en la línea de retraso.

El ánodo y el marco que lo sujeta tienen el mismo grosor, por lo que los alambres una vez soldados estarán en el mismo plano que la cara superior del marco de aluminio. Para evitar la fuga de gas en el marco que consta de cuatro piezas, se aplicó una capa muy delgada de silicón en las uniones. Para evitar la contaminación del gas por el silicón aplicado, dejamos orear el marco por 56 horas antes de cerrar el detector.

Después de tener listos los cátodos, comenzamos con la parte que concierne al ánodo. En el marco ya ensamblado y montados los circuitos impresos en donde irán los alambres, iniciamos soldando la base de la línea de retraso, para después, alambrear el ánodo. Se colocaron dos resistencias de 100 k Ω entre el primer y último pin de la línea de retraso que corresponden a las tierras, por lo que resulta en una resistencia equivalente de 50 k Ω (ver figura 34). Para este tipo de instrumentación, se recomienda que esta resistencia debe ser al menos 10 veces 50 Ω , condición que se cumple con nuestras resistencias. El objetivo es garantizar el acoplamiento de las impedancias tanto del detector como de la electrónica con que se conectará, y así evitar lecturas correspondientes a una reflexión de la señal. En el siguiente capítulo se explica la importancia de estas resistencias.

Hecho lo anterior, continuamos con la parte que corresponde al alambrado de la cámara multialámbrica. En esta parte, para lograr una misma tensión en cada uno de los alambres, primero se soldó un extremo del alambre y acto seguido se amarraba una masa de 116.3 g al otro extremo del alambre, con lo que se tensaba el alambre y entonces se soldaba en el otro extremo (ver figura 35). Este método resultó práctico para el prototipo, pues solamente se soldaron 12 alambres de 10 cm de longitud cada uno. Los alambres de guarda se colocaron según la siguiente disposición: los dos alambres próximos a los alambres del ánodo son de 25 μm y el último alambre de guarda de 50 μm . Cuando se tenga que alambrear el detector grande se tendrá que recurrir a una técnica alterna, pues con la aquí expuesta llevaría mucho tiempo.

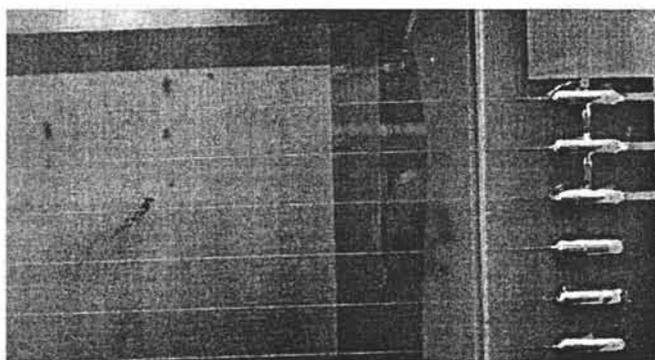
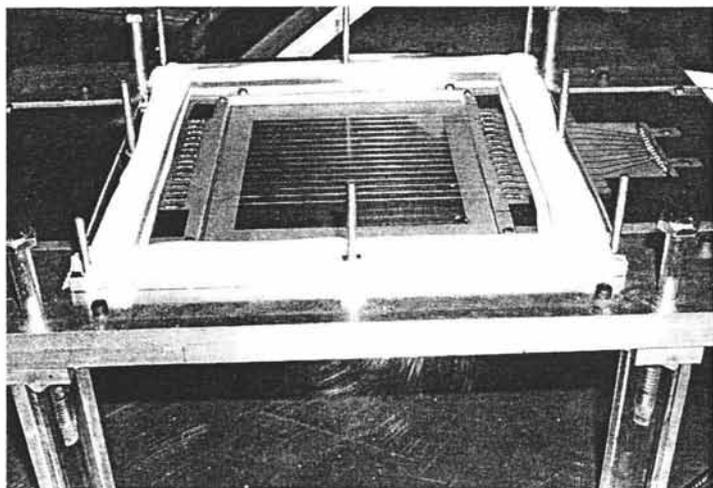
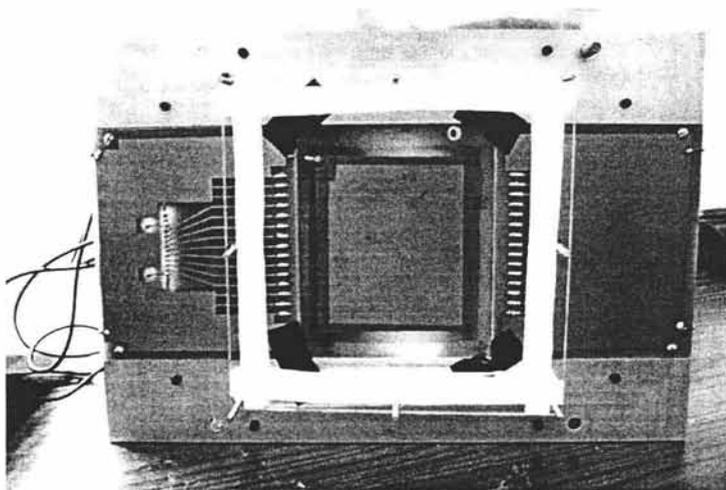


Figura 35. Alambrado del detector.

Cuando se trabaje con el detector con la finalidad de tener un mismo potencial de tierra, la tierra del ánodo se conectará a la estructura del detector en más de un punto, para así garantizar la mejor conductividad posible entre elementos. Las conexiones se harán mediante cables caimán entre los tornillos de $\frac{1}{8}$ " de la estructura y la tierra del ánodo. Para evitar posibles descargas entre los cátodos y las esquinas de la estructura, se les colocó cinta mágica como aislante.



a)



b)

Figura 36. Vista al interior del detector. a) Se puede observar la forma en que quedarán los cátodos y los alambres y el separador de acrílico. b) Apariencia final del detector antes de ser cerrado.

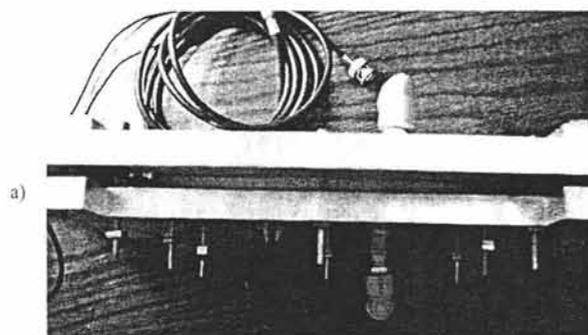
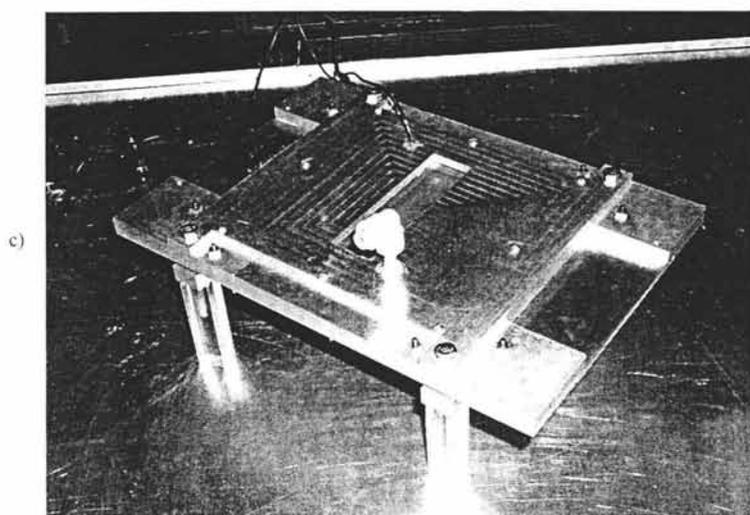
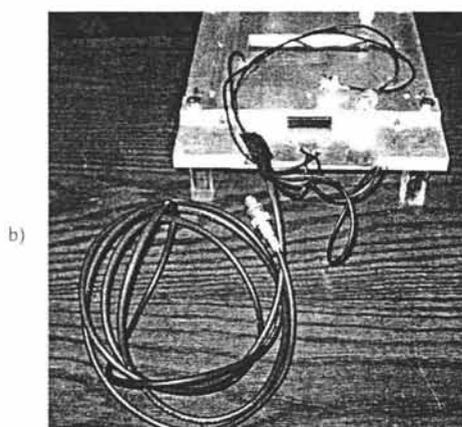


Figura 37. Detector multialámbrico.
 a) Vista lateral del detector, se aprecian los conectores de entrada y salida del gas, así como los cables que llevan el alto voltaje a los cátodos. b) El cable largo es el que se conecta a la fuente de alto voltaje, en la unión de este cable con los que se conectan a los cátodos es donde se encuentra la resistencia de $4\text{ M}\Omega$. c) En esta posición se trabajará con el detector, se aprecia la ventana que servirá para efectos de calibración.



A modo de mantener la misma separación entre ánodo y cátodos fue necesario construir un separador de 5 mm. Al momento de hacer el sándwich con las piezas (dos tapas y un ánodo), la tapa superior y el ánodo tienen una separación de 5 mm, dada por el espesor del marco de aluminio que sostiene el ánodo menos el espesor de la placa de $\frac{1}{8}$ " de FR4. Sin embargo, la separación entre la tapa inferior y el ánodo es prácticamente cero, por lo que debimos colocar un separador de 5 mm para tener la misma separación entre las tapas y el ánodo. El material con que se hizo el separador es acrílico porque es fácil de trabajar, factible conseguirlo en este espesor, no contamina el gas y su precio es accesible.

Entre la tapa superior y el ánodo se sella el detector con una goma cilíndrica llamada O'ring de $\frac{1}{16}$ ", se coloca en la ranura que a ex profeso se hizo en estas dos piezas; tanto en la unión del separador con el ánodo y en la unión con la tapa inferior, para sellar el detector utilizamos cinta tellón de 9 mm de ancho, se colocaron tres capas de cinta por lado. En la figura 36 se puede observar el detector ya alambrado, con el cátodo inferior y el marco de acrílico.

Por último, se cerró el detector colocando la tapa superior sobre la estructura mostrada en la figura 36, con los tornillos de $\frac{1}{8}$ " que se encargarán de apretar la estructura de modo que aisle la atmósfera del detector de la del medio ambiente. A partir de este momento, los conectores NPT se cerrarán colocando cinta adhesiva en sus orificios, para evitar la intromisión de polvo al interior del detector. El mismo oxígeno que respiramos puede alterar las propiedades de operación del gas, por lo que es importante que antes de que se comience con la operación del detector, se purgue¹⁶ su atmósfera con la mezcla que se utilizará durante su funcionamiento. Este proceso también ayuda a eliminar los posibles residuos que se hayan introducido al detector. En la figura 37 se muestra la apariencia final del detector listo para trabajar.

¹⁶ En el siguiente capítulo se explica la forma en que se purgó el detector.

5. Mediciones y pruebas

Ahora que ya contamos con el detector completamente construido podemos comenzar con su proceso de acondicionamiento y calibración, para así dar paso a la realización de pruebas de operación y finalmente, realizar las mediciones de detección de muones.

Cabe mencionar que no es necesario realizar todo este proceso de calibración bajo la pirámide del Sol en Teotihuacan, siendo posible hacerlo en un laboratorio. Como mencionamos anteriormente, los muones que mayor conteo registrarán, serán los de bajas energías [17]. De estos muones, los que nos serán de mayor utilidad, son los que lleguen al detector con energías mayores a 2 GeV. Esta consideración se debe a que los muones con energías menores a 2 GeV, serán desviados de la trayectoria original con que incidieron en la pirámide por un fenómeno conocido como *dispersión múltiple* [21]. Esta dispersión se debe principalmente a las interacciones con la materia que atraviesan, por lo que la lectura de una medición correspondiente a muones de bajas energías introduce un grado de error al registro del lugar de incidencia.

Sin embargo, los muones de bajas energías son los que aportarán la estadística necesaria para poder determinar si existe o no un espacio vacío al interior de la Pirámide del Sol. En caso de que llegase a existir, los muones de bajas energías que pasen por este hueco, aportarán numerosas lecturas de eventos ionizantes. Si estos mismos muones no encontraran el hueco que buscamos, en su camino serían detenidos por la materia que constituye la Pirámide, logrando atravesarla completamente los que tuviesen un poco más de energía (~ 18 GeV [16]). De esta forma, al momento de analizar los resultados, esperamos encontrar una región con un mayor número de registros de eventos ionizantes, para que podamos entonces relacionarlo con la existencia de un espacio vacío dentro de la Pirámide del Sol.

Para efectos de calibración y prueba de nuestra cámara multialámbrica, no es necesario estar en el túnel de detección bajo la Pirámide, pues si pensamos que los muones que queremos detectar, en el peor de los casos recorrerán 80 metros de pirámide antes de llegar al detector, podemos darnos cuenta de que un muón que sea detectado en el túnel de observación, también será detectado en un laboratorio en donde, a lo sumo, la cantidad de materia que tendrá que atravesar será de 1 metro de concreto.

5.1 Descripción de la instrumentación electrónica.

De nada sirve tener el detector construido si no contamos con la instrumentación adecuada para realizar nuestras mediciones. Cuando se trabaja con partículas, la instrumentación más apropiada es la tipo *NIM (Nuclear Instrument Module)* como actualmente se le conoce, siendo primeramente denominada como *Nuclear Instrumentation Methods* cuando en 1964 se establece este estándar para la instrumentación que manejarían los físicos nucleares y de altas energías.

El estándar NIM se creó para facilitar la instrumentación de experimentos, por lo que se pensó en utilizar un "crate" ó "bin" (contenedor) en donde se colocan cada uno de los elementos de medición (ver figura 38) como pueden ser: amplificadores, discriminadores, fuentes de voltaje, unidades de coincidencia, etc. Cada uno de estos elementos al ser vistos como módulos de instrumentación, cumplen con las mismas características eléctricas y mecánicas, lo que facilita su empleo al momento de instrumentar un experimento.

Independientemente del fabricante o de la función que realice el módulo, éste tendrá una altura de 8.75" y un ancho múltiplo de 1.35", de modo tal, que en un crate de 19" pueden colocarse hasta 12 módulos sencillos en sus canales. Todos estos módulos tienen en su parte posterior las entradas del voltaje de alimentación, diseño que permite tener mayor libertad al momento de instrumentar la electrónica de medición. El voltaje de alimentación puede ser intercambiable entre +6 V, -6 V, +12 V, -12 V, +24 V y -24 V según se requiera. La facilidad con la que se pueden agregar o quitar módulos durante la realización de experimentos, hace del estándar NIM el óptimo para la instrumentación de experimentos como el que realizaremos, además de ser las más adecuadas cuando se trabaja con partículas.

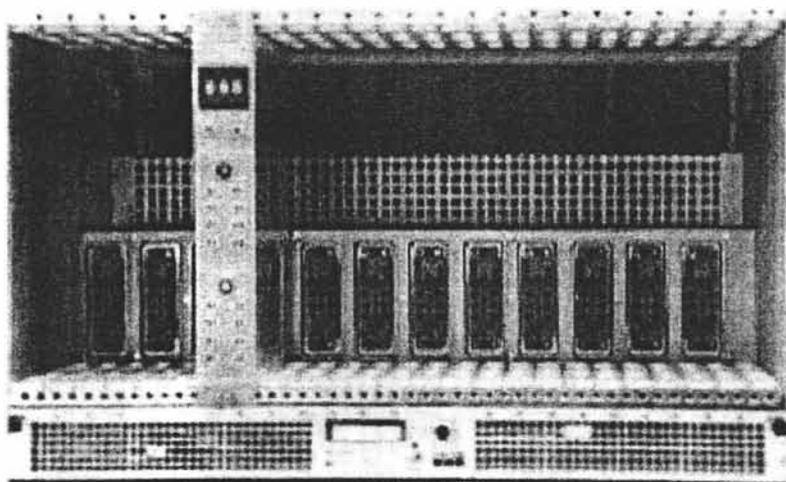


Figura 38. *Crate* NIM

En el estándar NIM se puede trabajar con señales como las que provienen de nuestro detector sin mayor problema, al tipo de señales que manejaremos en este estándar se les conoce como señales rápidas y se caracterizan por ser negativas y tener un *rise time*¹⁷ del orden de nanosegundos. Las impedancias de entrada y salida al igual que los cables son de

¹⁷ Tiempo invertido por un pulso en cambiar de un nivel bajo a un nivel alto, generalmente estos valores son el 10 y el 90% de su amplitud.

50 Ω . Existen dos niveles lógicos para las señales rápidas que son 0 y 1 que corresponden a 0 V y -1 V respectivamente.

Utilizaremos dos tipos de fuentes de alto voltaje para la instrumentación del sistema de detección, una de ellas únicamente alimentará los fotomultiplicadores y por otro lado, otra fuente de alto voltaje se encargará de suministrar el voltaje a los cátodos de la cámara multilámbtrica. Estas fuentes de voltaje se muestran en las figuras 39a y 39b.

Fuente de Alto Voltaje 3125 Canberra

Con esta fuente doble alimentaremos los cátodos de la cámara multilámbtrica, tiene una salida regulada de 0 a ± 5000 V con una corriente que va de 0 a 300 μA . Está protegida contra sobrecargas y cortos circuitos, es una fuente muy estable con rizados menores a 10 mV cuando trabaja a 300 μA . Permite conocer la polaridad del voltaje con que se trabaja mediante el encendido de un foco, aunque no se haya aplicado voltaje. Seleccionamos esta fuente por la cantidad de corriente que maneja y el rango de voltajes que posee. En caso de cualquier incidente que pudiese ocurrir al interior del detector que pusiera la fuente en corto circuito, independientemente de la protección con que cuente la fuente, hace más seguro su manejo.

En la parte posterior de esta fuente de estándar NIM se selecciona la polaridad con que se trabajará, mientras que mediante la perilla frontal se incrementa el voltaje según se requiera, cada vuelta completa de la perilla equivale a 1000 V. Una vez ajustado el voltaje, por seguridad se puede poner un seguro que evita el movimiento involuntario de la perilla, de modo que se previene un cambio en el voltaje aplicado. La fuente se muestra en la figura 39a.



Figura 39a. Fuente de alto voltaje
Canberra 3125

Fuente de Alto Voltaje 3002D

Quien nos proporcionará el alto voltaje para los fotomultiplicadores es la fuente 3002D de Canberra, cuenta con una pantalla de cristal líquido que muestra el voltaje que se está aplicando, que puede ser de 0 a 3000 V con una corriente de hasta 10 mA. El alto voltaje puede ser positivo o negativo según se requiera, con el indicador luminoso se conoce la polaridad del voltaje, antes de que éste sea aplicado. Este modelo tiene protección contra

sobrecargas y corto circuito. Así como el resto de los elementos de instrumentación que utilizaremos, esta fuente es compatible con el estándar NIM, y fue diseñada esencialmente para la operación de todo tipo de detectores de radiación nuclear. Particularmente se recomienda para usarse con detectores de centelleo.

Aunque ocupa doble espacio en el *crate* NIM no es necesario trabajar con la fuente dentro del *crate*, dado que puede trabajar fuera de él, pues se alimenta con 115 o 220V que toma directo de un contacto. En la figura 39b se muestra la apariencia de la fuente.

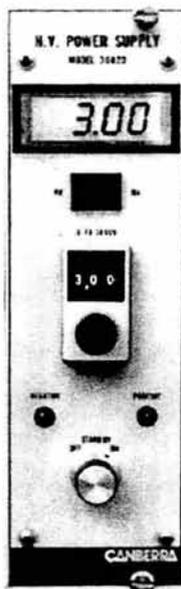


Figura 39b. Fuente de alto voltaje 3002D Canberra.

Preamp 142C Ortec

Antes de llegar a la instrumentación con los módulos NIM, mencionaremos la importancia del preamplificador sensible a la carga 142C de la compañía Ortec (ver figura 40).

Este preamplificador es el primero en conectarse al detector, pues es capaz de transformar la señal de corriente que se colecta en el ánodo en una señal de voltaje, además de que le proporciona una ganancia. La elección del modelo de preamplificador está en función de la capacitancia que posea el detector, una aproximación rápida al valor de capacitancia que tendrá el detector de tamaño real se logra pensando en que se trata de un detector de placas paralelas con aire como dieléctrico. El valor aproximado es de 800 pF, por lo que se eligió el modelo 142C Ortec diseñado para trabajar con detectores cuyos valores de capacitancia

van de 400 a 2000 pF. Los modelos A y B se recomiendan para valores menores de capacitancia.

Este modelo tiene una ganancia en lazo abierto de hasta 80000, con un nivel de ruido muy bajo¹⁸ y un *rise time* menor a 5 ns. Los conectores de entrada y salida son de tipo BNC terminados a 50 Ω . Se polariza con +24 V con 40 mA, -24 V con 10 mA y ± 12 V con 15 mA que toma de la parte posterior de un módulo tipo NIM que cuente con dichas salidas de voltaje. El tamaño del 142C es pequeño, facilitando su manejo y resulta ventajoso al momento de instrumentar el detector, ya que dentro del túnel de detección en Teotihuacan no se dispone de mucho espacio.

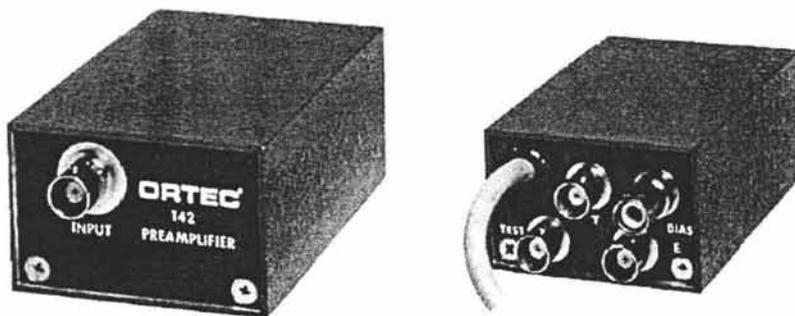


Figura 40. Preamplificador sensible a la carga 142 de Ortec.

El preamplificador tiene dos tipos de salida, salida en tiempo y salida en energía. Nosotros trabajaremos con la salida de tiempo, pues nos interesa conocer los tiempos en que se genera la señal en el detector, y no su contribución de energía.

Con una señal de voltaje amplificada es fácil observar el comportamiento del detector por medio de electrónica que trabaja con señales de voltaje, como es el caso de un osciloscopio. De esta manera, antes de pasar al resto de la instrumentación podemos verificar el funcionamiento del detector y observar su comportamiento antes de completar la instrumentación necesaria para la detección de muones.

Como mencionamos en el capítulo anterior, en la salida de las líneas de retraso (delay lines) se colocaron dos resistencias de 100 k Ω en paralelo con el objetivo de acoplar las impedancias del detector y del preamplificador (ver figura 41). Aunque las líneas de retraso están diseñadas para tener una impedancia de salida de 50 Ω , el colocar las resistencias de 100 k Ω en paralelo equivale a tener una resistencia de 50 k Ω en paralelo con la resistencia

¹⁸ Alrededor de 14 keV, que cuando se compara con los valores de al menos 2 GeV que se captarán en el detector resulta un nivel de ruido muy bajo. Equivalen a 4 mV.

de entrada de 50Ω del preamplificador sensible a la carga; la resistencia equivalente total es de $49.95 \approx 50 \Omega$. Al forzar de esta manera el acoplamiento de las impedancias garantizamos que la transmisión de las señales entre el detector y el preamplificador será máxima y la distorsión mínima. Como ya se dijo, en caso de que se presente una sobre corriente en el circuito (por una chispa), estas resistencias evitarán que se dañen las líneas de retraso y también protegerán al preamplificador.

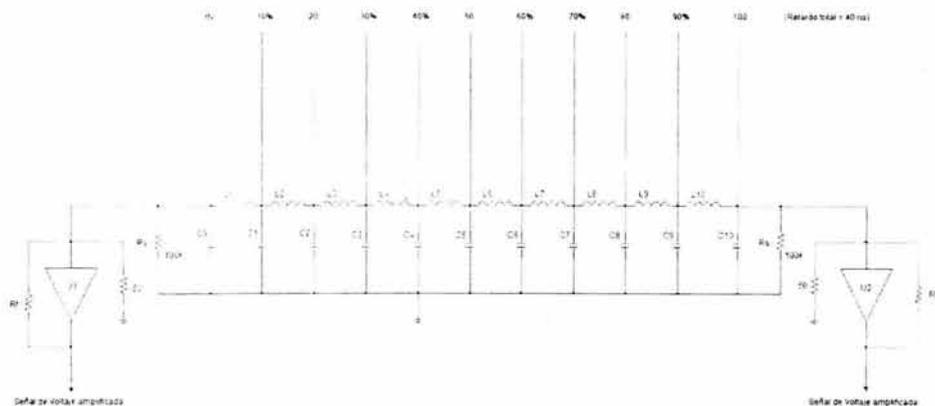


Figura 41. Diagrama electrónico de la línea de retraso y su conexión con los amplificadores sensibles a la carga.

FIFO 740 Phillips

Es un módulo de ganancia unitaria de cuatro canales que permite obtener seis salidas para una misma señal, cuatro de las cuales son no invertidas y las otras invertidas. Utiliza conectores tipo LEMO, y las señales de entrada pueden ser negativas o positivas. Como todos los módulos que describiremos, su impedancia es de 50Ω y se polarizan directamente al colocarse en el *crate*. El uso de este módulo permite trabajar varios instrumentos con una sola señal, lo cual es útil si se requiere que una misma señal sea conectada a varios instrumentos, como es nuestro caso. En la figura 42 se muestran los módulos de instrumentación NIM que vamos a utilizar. En el apéndice 1 se encuentran las hojas de especificaciones de todos estos módulos.

Los cables LEMO (ver figura 43) son de un estándar especial diseñados para tener pérdidas y distorsión mínimas al momento de transmitir una señal. La especificación técnica de los cables LEMO es la RG-174/U con una impedancia de 50Ω . No obstante, estos cables introducen un retraso en las señales de $\approx 3 \text{ ns/m}$, factor que puede ser crítico en nuestro proyecto si no se toma en cuenta. Por esta razón, los cables LEMO que utilizaremos en

medida de lo posible serán cortos y cuando se trate de comparar señales en tiempo, se debe procurar emplear cables de la misma longitud.

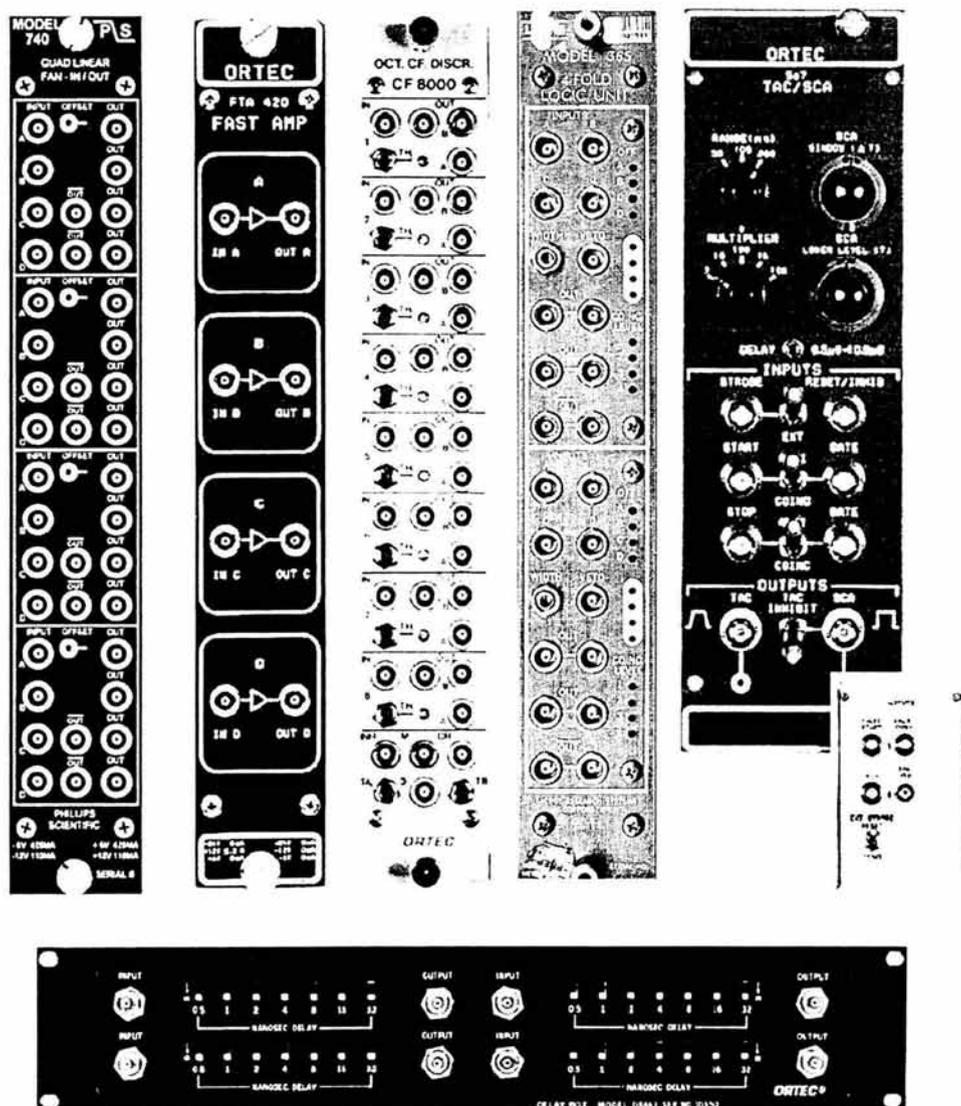


Figura 42. Módulos utilizados para la instrumentación del detector.



Figura 43. Cables LEMO.

FTA 420C Ortec.

La función del preamplificador sensible a la carga es en mayor parte, el transformar la señal de corriente proveniente del detector multilámbrico en una señal de voltaje, que pueda ser leída por el resto de los módulos de instrumentación. Aunque el preamplificador añade una cierta ganancia a dicha señal, no es la suficiente para poder realizar un proceso de discriminación en que se limpie de ruido la señal. El módulo en que se lleva a cabo este proceso de discriminación se describe a continuación, pero ahora diremos que los niveles de voltaje que fija como mínimos para no ser considerados como ruido, son del orden de los que provienen del preamplificador sensible a la carga. Si se pretendiera conectar directamente la señal del módulo 142C al discriminador, como resultado tendríamos que toda la señal sería considerada como ruido y por tanto, eliminada.

De ahí surge la necesidad de amplificar aún más la señal proveniente del módulo 142C, y lo hacemos en el módulo FTA 420C. Este módulo cuenta con 4 amplificadores rápidos, cuyo rise time es menor a 1 ns y amplifica 20 veces la señal de entrada. Fue diseñado para amplificar señales analógicas rápidas¹⁹ como son las que provienen de fotomultiplicadores, multiplicadores de electrones, fotodiodos y detectores de partículas como el nuestro. El ancho de banda en que trabaja es de 10 a 350 MHz, y una ventaja adicional es que el nivel de ruido que maneja es menor a los 40 μ V. La impedancia de entrada es de 50 Ω y a la salida tenemos una señal que va de 0 a -5 V para una carga de 50 Ω .

CF8000 Ortec

Este es el módulo que hace la discriminación de niveles del que hemos hablado. La técnica que utiliza para lograr la discriminación se conoce como *fracción constante de tiempo* o *constant fraction*. La técnica consiste en dividir en dos la señal y así, una de ellas se retrasa un tiempo τ_d igual al intervalo entre el valor de la fracción constante y el pico (Vd). La otra señal es invertida y atenuada en un factor k (fracción constante de discriminación), de modo que la altura del pulso es $V_r = -k V_a$. La discriminación se da en el punto en que la suma de ambas señales da cero; este punto es una fracción constante k de la altura del pulso de la señal original (ver figura 44). El proceso se repite para todas las señales de entrada, por lo que al final se tiene una señal como la que aparece en la figura 45.

¹⁹ Se considera que una señal es rápida, si su rise time es menor a 5 ns.

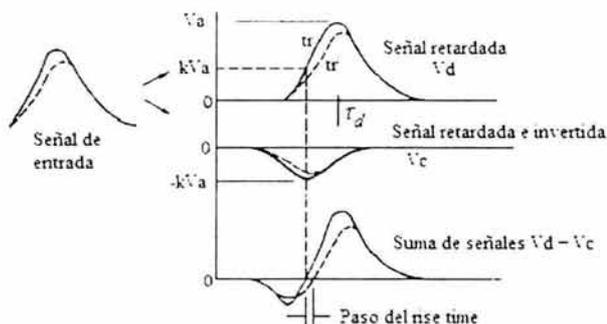


Figura 44. Técnica de la fracción constante.

La ventaja que representa el utilizar esta técnica como método de discriminación, es que no se tienen problemas de "walk time" o "tiempo de transición", causadas por la interpretación de un nivel de discriminación de voltaje. Si únicamente se fijara un nivel de voltaje tal que, si la señal de entrada superase dicho nivel, entonces como resultado de la discriminación se obtendría un pulso cuadrado como señal de salida, pero no sería único, ya que si la siguiente señal no llegase con las mismas características que su predecesora, se presentaría el efecto de walk time, que en pocas palabras significa que tendríamos una señal con ruido (ver figura 46).

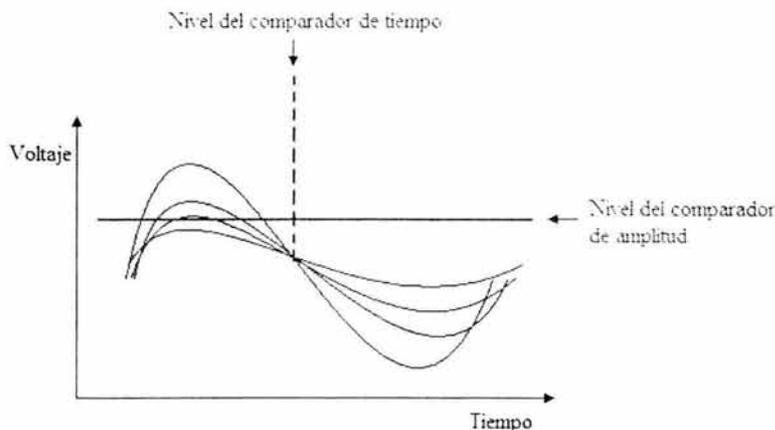


Figura 45. Forma en que se ven las señales ajustadas por el CF8000.

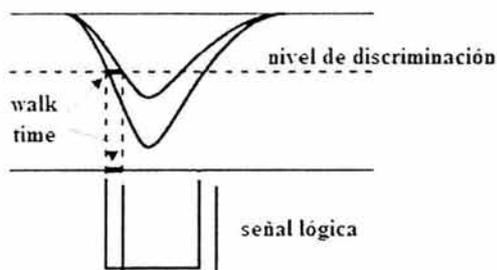


Figura 46. Resultado de un discriminador que utiliza la técnica del flanco de subida.

La técnica de la fracción constante de tiempo tiene como ventaja que hace este *walk time* prácticamente cero, y por lo tanto, no presenta a la salida mas que una sola señal. El CF8000 es un discriminador que utiliza la técnica *constant fraction* por lo que no tenemos problemas de *walk time*: el ajuste del nivel de discriminación de voltaje se hace por medio de un tornillo que tiene en la parte frontal, mientras que el ajuste del retraso de tiempo lo hace por medio de jumpers, por lo que no es necesario el empleo de cables para introducir tal retraso.

La forma en que el CF8000 hace la discriminación es básicamente la siguiente: Cuando una señal alcanza el voltaje de discriminación fijado por nosotros, el módulo arroja un pulso cuadrado. Este es el pulso de amplitud.

Con el valor de retraso de tiempo seleccionado en que se hará la discriminación, sólo las señales que cumplan con la condición de la fracción constante de tiempo tendrán un pulso cuadrado como salida, que se conoce como señal de tiempo. Por último, las señales de tiempo y amplitud son comparadas en una compuerta OR, por lo que únicamente cuando ambas señales son iguales, se logra una señal discriminada, que también tiene forma cuadrada, con una amplitud de -1 V y periodo de 80 ns. El diagrama electrónico correspondiente a este módulo se muestra en la figura 47.

El discriminador CF8000 cuenta con 8 canales independientes de discriminación, en los que el nivel de amplitud se puede variar en un rango de -10 mV a -1 V. Para lograr el ajuste en tiempo de las señales, se debe seleccionar el tiempo de retraso de la señal eligiendo entre 2, 4, 6, 8 o 10 ns. En nuestro caso, una ventana de tiempo de 2 ns fue suficiente para cumplir con nuestros requerimientos.

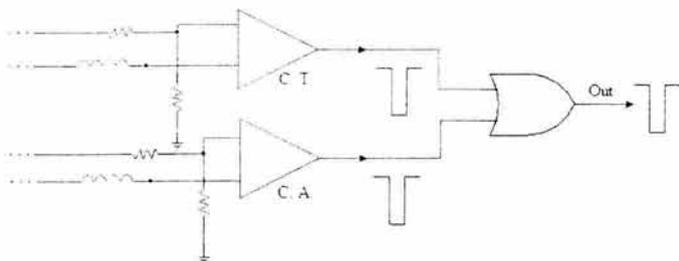


Figura 47. Circuito electrónico del discriminador CF8000.

Cada canal tiene tres salidas lógicas rápidas NIM, una "A" y dos "B" siendo ajustables sus amplitudes en tiempo con un solo control de amplitud para las ocho salidas "A" y un solo control para las salidas "B". La fracción constante de discriminación tiene un valor de fábrica de 0.4.

Lecroy 365AL

Este módulo es una unidad lógica de coincidencia, con la que podemos detectar coincidencias dobles, triples o cuádruples. El modelo *365AL* cuenta con dos unidades de coincidencia independiente uno del otro, las señales que acepta como señales de entrada son de tipo NIM (cuadradas de -1 V y 80 ns) mediante conectores tipo LEMO.

De acuerdo al número de señales que se trabajen en el módulo, se retirarán los jumpers de los canales de entrada que se utilicen, quedando colocados únicamente en los canales sin usar. Asimismo, se indica el nivel de coincidencia que se quiere trabajar, colocando un jumper en el nivel correspondiente (2, 3 o 4). El empleo de jumpers para habilitar las señales de entrada así como para indicar el nivel de coincidencia con que se quiere trabajar facilita la instrumentación del experimento, pues basta con mover un jumper para cambiar el nivel de coincidencia o las señales de entrada.

Cuando ocurre que coinciden dos o más señales de entrada (según se requiera el nivel de coincidencia), el módulo arroja una señal de estándar NIM que es independiente de la amplitud o forma de las señales de entrada. El intervalo de tiempo que se considera para que ocurra la coincidencia de las señales de entrada es menor a 10ns (ver figura 48). La amplitud en tiempo de la señal de salida puede ser modificada en un rango de 4 a 50 ns, gracias a un potenciómetro que se encuentra en la parte frontal del módulo. Para variar esta amplitud es necesario utilizar un desarmador.

Al igual que los módulos previamente mencionados, la Unidad Lógica de Coincidencia toma su voltaje de alimentación de la parte trasera del *crate* NIM. También maneja las impedancias de entrada de 50Ω .

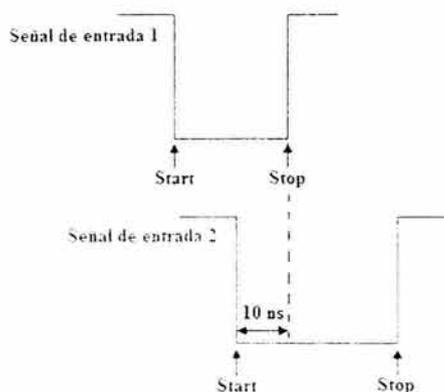


Figura 48. Representación gráfica de la condición necesaria para que se presente una coincidencia en el módulo 365AL.

DB463 Ortec

Se trata de una caja de retraso con cuatro secciones independientes, cada una de las cuales es capaz de retrasar una señal de entrada hasta 63.5 ns, por lo que si se utilizan todos los retrasos de la caja, se tendrá un máximo retraso de 254 ns. En cada sección los incrementos tienen el siguiente orden: 0.5 ns, 1 ns, 2 ns, 4 ns, 8 ns, 16 ns y 32 ns. La suma de cada uno de los retrasos de cada sección da como resultado los 63.5 ns. En la figura 49 se muestra el diagrama esquemático de la caja de retraso.

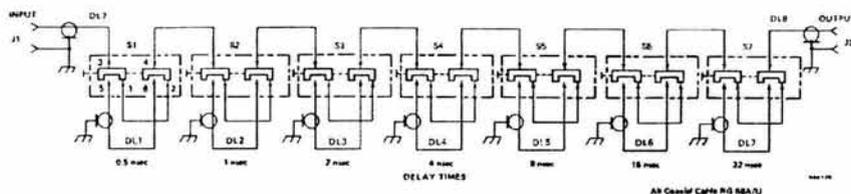


Figura 49. Diagrama esquemático de una caja de retraso DB463.

Esta caja de retraso es apropiada cuando se trabaja con señales que provienen de dispositivos de coincidencia, o con señales que entrarán a dispositivos convertidores de tiempo en amplitud.

Las impedancias tanto de entrada como de salida son de 50Ω , los conectores que utiliza son de tipo BNC.

TAC567 Ortec

Convertidor de tiempo en amplitud de un solo canal, que requiere de dos pulsos de entrada: inicio y paro (start y stop) respectivamente, para entregar una señal analógica con una amplitud correspondiente al tiempo medido entre la aparición del pulso de start y del stop.

Para fijar los umbrales de tiempo en que las señales de start y stop serán válidas, se emplean las perillas que controlan dicho tiempo y van de 50 ns a 2 μ s. Si se cumplen con las condiciones de start y stop, y no hay otra restricción, a la salida, el módulo entrega una señal de amplitud correspondiente al tiempo que pasó entre el start y el stop.

Las señales que sirven de start y stop pueden ser las provenientes de nuestro experimento o de una fuente externa, en cuyo caso el TAC puede sincronizar las señales de disparo para el start y el stop con dichas fuentes externas. Otra función de este módulo es la que permite limpiar la señal de salida. Esto se hace mediante una discriminación entre las señales recientemente convertidas y un nivel mínimo y máximo de voltaje de una señal de referencia. A los niveles que determinan si se toma en cuenta o no la señal recién transformada se les llama *SCA Window (Single Channel Analyzer)*. Mediante un interruptor de palanca en la parte frontal se activa o desactiva esta opción.

El TAC está diseñado para aceptar señales de estándar NIM ya sean positivas o negativas; el tiempo que tarda en convertir la señal es menor a 5ns y las señales que se obtienen a su salida van de 0 a 10 V, dependiendo de la diferencia de tiempo entre las señales de start y stop; el ancho de estos pulsos de salida se puede variar en un rango de 1 a 3 μ s. Para un óptimo desempeño del TAC es recomendable conectarlo a un analizador de multicanales acoplado en dc. de esta manera se logra una tasa de conteo máxima.

ADCAM MCA 916-4k Ortec

La pieza central de casi cualquier sistema de espectroscopia nuclear es el analizador de multicanales (multichannel analyzer MCA). El funcionamiento básico de un MCA es el recoger y almacenar, en un histograma de memoria, los datos del espectro adquiridos por un sistema de detección, y sea capaz de presentar esos datos en una pantalla para analizarlos posteriormente.

Los modos de adquisición más comúnmente empleados para un MCA son: modo de análisis por altura de pulsos (Pulse-Height Analysis PHA), modo de escalamiento de multicanales (Multichannel-Scaling Mode MCS) y, modo muestreo (Sample Mode). A continuación se describen brevemente cada uno de estos modos de funcionamiento.

En el modo de escalamiento de multicanales, la adquisición de datos se hace a intervalos de tiempo, de manera que transcurrido un primer intervalo de tiempo, los datos adquiridos son almacenados en la localidad de memoria correspondiente a un canal del MCA.

Posteriormente se inicia el conteo del siguiente intervalo de tiempo, los datos adquiridos en este nuevo intervalo son almacenados en la localidad correspondiente al siguiente canal del MCA y así sucesivamente.

En el modo de muestreo, es posible almacenar valores secuenciales de energía de la señal de entrada en canales individuales. De esta manera los eventos de entrada pueden almacenarse hasta que la memoria esté llena, punto en el cual los datos deberán ser descargados en un dispositivo de entrada/salida, y la secuencia de almacenamiento deberá reiniciarse al inicio de la memoria.

Finalmente describimos el modo tradicional de operación de un MCA, que es el modo de análisis de altura de pulso (Pulse-Height Análisis Mode PHA). Se usa para acumular un espectro (histograma) de la distribución de frecuencias de las alturas de una secuencia de pulsos de entrada. El espectro deseado es acumulado por la medición de la amplitud de cada evento de entrada, convirtiéndolo en un número o dirección de canal que es proporcional a la altura del pulso y almacena la información en una memoria compuesta de canales individuales. Los pulsos o eventos de entrada que le haremos llegar al MCA serán los pulsos que salen del TAC.

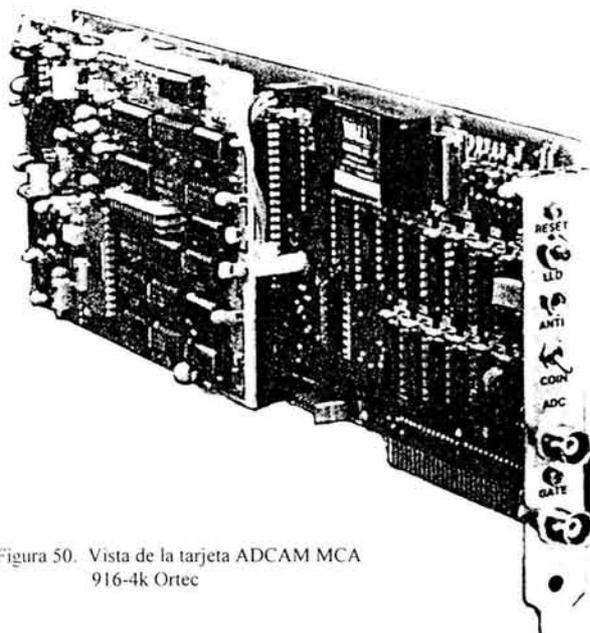


Figura 50. Vista de la tarjeta ADCAM MCA 916-4k Ortec

El ADCAM MCA 916-4k de Ortec es un convertidor analógico digital, con un software que emula un analizador de multicanales, quienes en conjunto nos permitirán llevar el

conteo de eventos ocurridos al interior del detector multialámbrico. La tarjeta fue instalada en un slot tipo PCMCIA de una computadora 486 (ver figura 50). El software que ejecuta el MCA se corre desde el ambiente DOS de la computadora. El modo de adquisición en que trabajará el MCA será el modo PHA, este modelo cuenta con 4096 canales en los cuales se repartirán los tiempos proporcionales a los retrasos existentes entre cada uno de los alambres de nuestro detector.

En estos 4096 canales se repartirá el conteo del detector y finalmente se deberá formar la "estructura de alambres" característica de un detector multialámbrico. Esta estructura debe visualizarse como un peine, del cual las cerdas representarán la contribución de cada alambre que contenga la cámara multialámbrica. La separación entre cerdas deberá ser de 4 ns, que corresponde al retraso en los alambres, producto de su conexión a las líneas de retraso (delay lines). Mientras más definida sea la forma de la estructura, mayor será la resolución del detector. Cabe recalcar que este espectro está formado por las cuentas de eventos registrados por la cámara multialámbrica.

5.2 Conexiones.

La forma en que se conectan los módulos sigue una lógica y su objetivo es acondicionar las señales provenientes del detector multialámbrico del forma tal, que sea posible la detección de eventos ionizantes en su interior, producto del paso de muones. Un diagrama de bloques que muestra la forma en que se instrumentó el detector se muestra en la figura 51a y en la figura 51b se muestra físicamente la instrumentación.

Para la instrumentación de la electrónica de medición, partimos de nuestros dos tipos de detectores: los centelleadores, quienes van a verificar la ocurrencia de eventos, y, las cámaras multialámbricas que son quienes nos darán la ubicación del lugar en que ocurrió el evento.

Las señales que se generan en el ánodo del detector multialámbrico no pueden ser tomadas inmediatamente por los aparatos que utilizamos para la medición, puesto que se trata de una señal de corriente, que además es muy pequeña. El tipo de señales que leen nuestros aparatos de medición son de voltaje, por lo que es necesario acondicionar esta señal para que sea compatible con nuestros instrumentos.

El preamplificador sensible a la carga es quien se encarga de transformar esa corriente en voltaje y a su vez, le incrementa un cierto factor de ganancia. Estas señales ahora sí pueden ser vistas en un osciloscopio o directamente ser conectadas a los instrumentos. Sin embargo, necesitamos que esta señal sea amplificada aun más, para que podamos eliminar el ruido sin peligro de perder parte de información. Utilizaremos el amplificador rápido 420 de Ortec para este propósito, y ahora, con una señal incrementada 20 veces, ya podemos eliminar la mayor cantidad de ruido posible, sin poner en riesgo la información de la señal.

Es recomendable conectar las señales de la mwpc y de los centelleadores al módulo FIFO para poder monitorear en el osciloscopio las señales en todo momento, además de que nos facilita el disponer de cualquiera de estas señales para conectarla a otro módulo.

Como es propio de cualquier sistema, las señales provenientes de la mwpc y de los centelleadores poseen un nivel de ruido inherente, que debe ser eliminado para realizar mediciones confiables y no producto de un sistema ruidoso. Con ayuda del módulo CF8000 de Ortec y el osciloscopio, definimos los niveles de ruido que sí nos permiten trabajar sin poner en duda los resultados de las mediciones. El encendido de una lámpara fluorescente incluso puede emitir tal energía que logra despertar a los fotomultiplicadores, lo que por ejemplo, sería traducido como la ocurrencia de un evento cuando en realidad no fue así. Los niveles de discriminación (se ajustan girando un tornillo en la parte frontal del módulo) pueden ser ajustados a nuestra preferencia.

Ya que con los centelleadores vamos a monitorear la ocurrencia de un evento y dada su confiabilidad, es que los tomaremos como referencia para iniciar nuestro conteo. Los fotomultiplicadores se encienden con un voltaje de -1500 V que obtienen de la fuente de alto voltaje 3002D. Cuando ocurra que los centelleadores detectan un mismo evento, en el módulo Lecroy 365 AL se detectará la coincidencia del evento registrado en ambos detectores y como resultado, este módulo de coincidencias buscará una coincidencia con una de las señales que provienen del detector. Si se cumple esta nueva coincidencia, la nueva señal de coincidencia activará el TAC, en donde 190.5 ns después (debido a la caja de retraso), llegará la otra señal del detector.

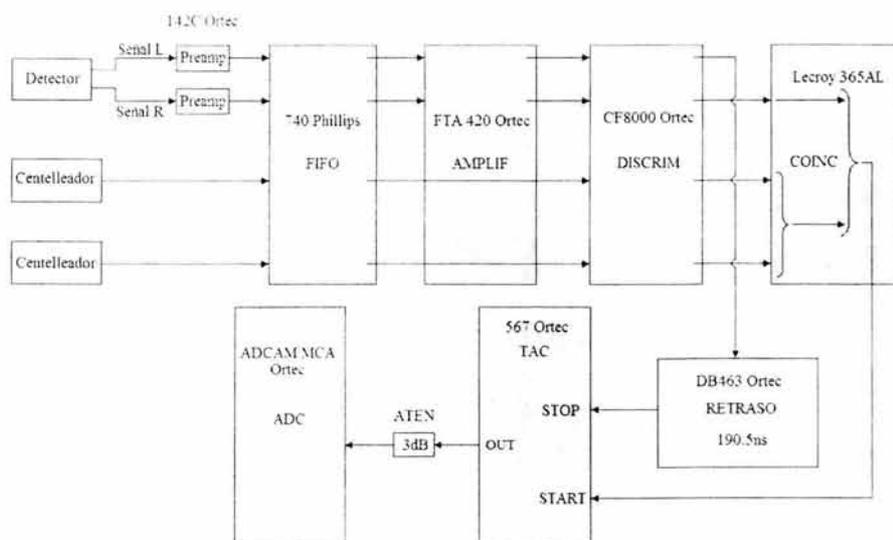


Figura 51a. Esquema que muestra la forma en que se conectan los módulos de instrumentación electrónica para la medición de muones.

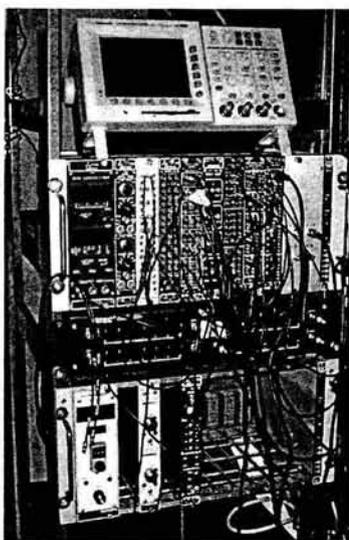


Figura 51b. Instrumentación de los módulos empleados para nuestro sistema de detección.

Una vez que se registran en el TAC las señales de *Start* y *Stop*, se manda hacia el ADC la señal resultante para ser contabilizada. Como se observó que la amplitud de la señal era muy grande y no podía ser vista por el ADC de manera adecuada, se colocó entre el TAC y el ADC un atenuador de 3 dB. Con esta modificación se logró registrar las señales en toda su amplitud y sin problemas de saturación. Finalmente tenemos que el MCA forma un espectro que, cuando toda la instrumentación ha sido perfectamente calibrada, tendrá la forma de estructura de alambres. En el caso de la detección de muones, el espectro tardará horas en formarse transcurridas las cuales, aparecerá la estructura de alambres, mientras que para el caso de las *Betas* sólo basta con unos minutos.

5.3 Acondicionamiento del detector.

Al trabajar por primera vez con un detector multialámbrico, es necesario seguir un cierto proceso de acondicionamiento del detector antes de comenzar a trabajar con él. Este acondicionamiento consiste en llenar el detector con el gas (o mezcla de gases) con que se trabajará, por un periodo de al menos dos horas antes de aplicar alto voltaje a los cátodos. El flujo de gas que entre a la cámara debe ser constante durante todo el tiempo en que se trabaje con ella, de modo que las condiciones del gas siempre sean las óptimas. Se busca generar una atmósfera uniforme al interior del detector, eliminando cualquier otro gas distinto al que se eligió. Debido a la toxicidad de los gases empleados en este tipo de experimentos, el gas que salga del detector debe ser evacuado del área de trabajo y de preferencia con salida al aire libre.

Cuando se llene el detector de gas por primera ocasión, es recomendable tener un flujo constante de gas a una presión un poco alta para que la entrada del gas al detector sea suficiente para sacar la mayor cantidad de polvo que hubiese quedado en su interior. Con una hora que esté circulando el gas al interior de la cámara será suficiente y entonces, será posible disminuir el flujo a los niveles en que se planea trabajar.

Hemos obtenido muy buenos resultados teniendo un flujo de $8 \text{ mm}^3/\text{s}$ a una presión de 0.4 bar, cuando se trata de la primer aplicación del gas, para posteriormente poder disminuir el flujo a $5 \text{ mm}^3/\text{s}$ y una presión de 0.2 bar.

Una vez que el detector tiene en su interior únicamente el gas deseado, se procede a aplicar alto voltaje a los cátodos. Cuando se aplica por primera vez el alto voltaje en los cátodos, es muy común que se presenten descargas en el detector a niveles bajos de voltaje. En parte se debe a las pelusas que pudiesen quedar dentro del detector en tal forma que propician la aparición de descargas, y pasado un cierto tiempo, es posible percatarse de que tales descargas han desaparecido.

Se comienza a aplicar el alto voltaje gradualmente y con incrementos no mayores a 100 volts por vez en intervalos de tiempo de 10 minutos, con esto evitamos el poner en riesgo tanto el detector como la instrumentación electrónica y la misma fuente de alto voltaje, en caso de que se presente una falla al interior del detector. El primer día que se aplique el alto voltaje es recomendable no llegar a la mitad del voltaje al que se estime como voltaje de operación, por ejemplo, si se estima un voltaje de operación de -2500 V , recomendamos no llegar a -1400 V . Llegando a este voltaje, hay que dejarlo así por un par de horas para luego dejarlo descansar hasta el siguiente día. La razón por la que se hace esta recomendación es porque debido a las minúsculas cantidades de polvo que quedan dentro del detector, éstas son un factor que propician las descargas eléctricas cuando se aplica el alto voltaje a los cátodos. También es como una medida de seguridad en caso de que al momento de cerrar el detector algún elemento pudiera quedar formando un corto circuito.

El segundo día nuevamente cada 5 o 10 minutos se incrementan 100 volts hasta llegar al voltaje mínimo al que se trabajará (alrededor de -2000 V), y nuevamente se recomienda dejar varias horas el detector en este nivel de voltaje. Al día siguiente se debe comenzar de la misma forma, y se debe mantener nuevamente el mismo voltaje y el mismo tiempo. Se recomienda que el tiempo que tome el aplicar el alto voltaje al detector cuando ya se va a trabajar con él por primera vez sea de al menos 2 horas, y en ocasiones subsecuentes bastará con 15 minutos. Los días en que se lleve a cabo este acondicionamiento es muy importante mantener un flujo de gas constante y con bastante presión, a modo de eliminar los residuos que hemos mencionado. Es recomendable repetir este proceso durante al menos una semana, si no se sigue esta recomendación, hemos comprobado que la respuesta que se obtiene del detector es muy inestable. Más adelante se explica el por qué el periodo de acondicionamiento debe durar al menos una semana.

A este proceso de acondicionamiento le llamamos "purgado de la cámara". Una vez concluido el proceso de purgado de la cámara, se puede disminuir la presión con que el gas entra al detector. Con ayuda de un osciloscopio es aconsejable monitorear de manera constante el desempeño del detector, pues (sobre todo cuando se trata de la primera vez y

en el peor de los casos) puede suceder que en algún momento se llegue a romper algún alambre poniendo en contacto el alto voltaje de un cátodo con la tierra del detector, estableciendo un corto circuito entre la fuente de alto voltaje y el detector.

Generalmente en esta etapa se presentan la mayor cantidad de problemas (fallas de aislamiento, conexiones, etc.), pero una vez solucionados, el detector trabaja sin mayores complicaciones. Durante las primeras horas de trabajo con un detector nuevo es común que se presenten chispazos así como señales muy inestables, pero al paso de los días comienzan a desaparecer y el detector comienza a operar de manera estable, en ese momento podemos afirmar que el detector está listo para comenzar a trabajar. Cabe mencionar que es importante sellar los conectores de entrada y salida del gas de nuestro detector cada vez que se deje de trabajar con él, para evitar que se introduzca polvo o aire que contamine la atmósfera creada al interior del detector.

5.4 Calibración del detector.

Se ha mencionado que dada la energía con que viajan los muones es posible detectarlos bajo la pirámide o en un laboratorio; sin embargo, para efectos de calibración es difícil pensar que se trabaje con muones, pues su nivel de incidencia es muy bajo. Hablamos de que en la Ciudad de México para un par de detectores de centelleo de 57 cm^2 cada uno, con una separación entre ellos de 7.5 cm, en el laboratorio se detectaron 38 cuentas en un minuto. Si pensamos que requerimos de miles de cuentas para tener una lectura confiable, el tiempo que nos tomaría calibrar un detector contando muones, nos llevaría días de conteo.

El mayor inconveniente de calibrar el detector con muones reside en la cantidad de tiempo invertido en la realización de pruebas, para que después de obtener el primer conteo significativo, se pudiese sacar una conclusión y así, poder realizar una segunda prueba y observar los cambios que se presentasen. Este proceso llevaría días.

Una forma en que podemos tener un “flujo constante de partículas” es por medio de una fuente radioactiva (material radioactivo), de la que obtengamos las partículas de alta energía semejando una regadera de partículas.

Se considera que una fuente es radioactiva, cuando tiene que liberar partículas y fotones de forma natural, para asegurar su estabilidad atómica y nuclear.

Como recordamos, los muones son partículas con las características de un electrón pero son 200 veces más pesados y tienen carga eléctrica $\pm e$, donde $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}$. Por otra parte, a los electrones expulsados de fuentes radioactivas como el ^{90}Sr (Estroncio 90) se les conoce como “*Betas*” y se caracterizan por tener energías de hasta 2.27 MeV, por ser electrones también tienen carga eléctrica $-e$. Aunque la diferencia de energía entre los muones y las *Betas* es de tres órdenes de magnitud, nos serán útiles para calibrar la eficiencia del detector, ya que tanto los muones como las *Betas* viajan a una velocidad

cercana a la de la luz, y pierden una cantidad de energía constante al atravesar cualquier medio. Ambas se consideran como *mips*.



Figura 52. Fuente radioactiva ^{90}Sr (Estroncio 90) sobre un colimador.

Debido a la poca masa de las *Betas* (β 's), éstas rebotan y pierden su dirección varias veces, después de haber impactado con las moléculas del gas e incluso con las moléculas del detector (aluminio y fibra de vidrio), por lo cual no son una buena referencia para calibrar el detector en posición. Como mencionamos, servirán para calibrar la eficiencia del detector, esto es, conoceremos el valor del alto voltaje aplicado a los cátodos que nos permita obtener el mayor tamaño de señal proveniente del detector, una vez que las *Betas* hayan pasado por el detector.

Con una fuente de *Betas* (ver figura 52) será posible obtener resultados en cuestión de minutos lo que representa un gran avance al momento de realizar la calibración, pues el definir los umbrales de cada módulo de la instrumentación electrónica repercutirá finalmente en el conteo que logremos obtener con nuestro detector. Una óptima calibración del detector significa que de cada muón que atraviese el detector, se conozca perfectamente el lugar por donde atravesó, y dicho evento sea contabilizado por el sistema de detección.

La calibración del detector consiste en ajustar cada una de las partes que componen el sistema de medición del detector, hasta lograr un punto en el que las señales obtenidas de este sistema sean lo suficientemente limpias, de manera que no exista duda alguna de que la respuesta del detector ante la radiación cósmica es confiable. El proceso involucra varios factores que van desde la determinación del voltaje de operación del detector, hasta cuestiones tan específicas como el ajuste de los niveles de discriminación en el módulo CF8000.

Comenzamos con la calibración de nuestro detector ubicando la región de voltaje en que el detector tiene un comportamiento de tipo proporcional. Como se explicó en el Capítulo 2 de este trabajo, esta región corresponde al intervalo de valores de alto voltaje aplicado a los cátodos en que el detector además de comportarse como un detector proporcional, arroje señales de máxima amplitud, sin que se produzcan descargas.

Para lograrlo, sólo será necesario utilizar los preamplificadores sensibles a la carga y el osciloscopio. Dado que la avalancha que se produce en las cercanías de los alambres es función del voltaje aplicado a los cátodos y del tipo de gas empleado, para lograr una operación eficiente del detector se deben tomar en cuenta estos dos factores. La separación

entre cátodos también tiene que ver, pero ésa ya está definida, por lo que únicamente se puede jugar con el voltaje y el tipo de gas.

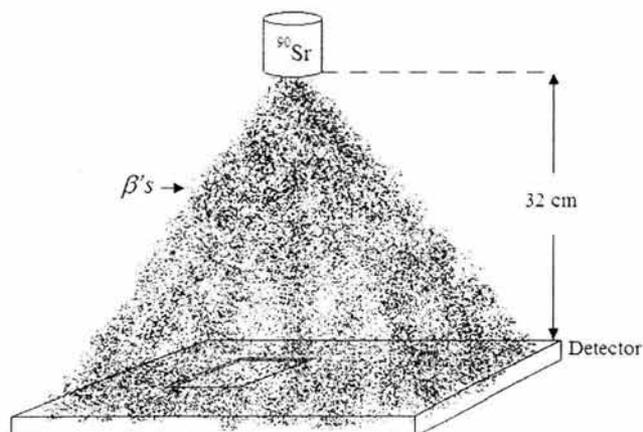


Figura 53. Forma en que se prueba el detector utilizando $\beta's$ como fuente radiactiva. La ventana en la tapa se utilizó como referencia de posición al colocar la fuente radiactiva.

Conectamos los preamplificadores Ortec 142C a cada lado del detector, de manera que se tenga la lectura del lado izquierdo y derecho de la cámara. Estas dos señales se conectan al osciloscopio²⁰, en donde mediremos la respuesta que tendrá el detector ante la fuente de $\beta's$ al incrementar el voltaje en los cátodos.

La fuente radiactiva se colocó sin colimador²¹ sobre una tabla 32 cm por encima del detector, de forma que, la lluvia de $\beta's$ “bañara” perfectamente el área activa de nuestro detector (ver figura 53). Esta distancia se mide entre la tapa superior del detector y la base de la fuente. En estas pruebas, el único factor que cambia es el voltaje, ya que la distancia entre ánodo y cátodos así como la separación de la fuente radiactiva y el detector, permanecen constantes.

Realizamos pruebas con los gases P-10 y CO_2 Ar (20%, 80%) para conocer su comportamiento en presencia del alto voltaje aplicado a los cátodos. Los resultados para cada uno de estos gases se muestran a continuación.

²⁰ Osciloscopio Tektronix TDS3052B, 500 MHz y 5 GS/s.

²¹ El colimador es una pieza de plomo con un pequeño orificio al centro. Se usa para limitar la sección del flujo de partículas emitidas por la fuente.

Una vez purgada la cámara multialámbrica, comenzamos las pruebas con el gas P-10 y un flujo de $7 \text{ mm}^3/\text{s}$ con una presión de 0.2 bar. Se empezaron a formar las señales el osciloscopio cuando llegamos a -1400 V , momento en el cual la amplitud de la señal que se forma en el osciloscopio alcanza una amplitud de -8 mV . Los incrementos de voltaje así como las amplitudes de la señal proveniente de la cámara se registran en la tabla 5.1.

Voltaje de cátodos [V]	Amplitud de la señal [mV]
-1400	-8
-1450	-9
-1500	-10
-1550	-14
-1600	-18
-1650	-25
-1700	-40
-1750	-64
-1800	-120

Tabla 5.1 Datos obtenidos usando el gas P-10 con β 's.

En la figura 54 se observa la curva que muestra el comportamiento del gas P-10 en presencia de alto voltaje. Se grafica el valor absoluto de la amplitud de la señal, sólo con la finalidad de que la gráfica sea más fácil de interpretar. En la curva, buscamos la región de voltaje en la cual se puedan relacionar la señal colectada por la cámara y el alto voltaje aplicado en los cátodos, por medio de un factor de multiplicación M , tal que, dicho factor sea constante [14,16]. El valor de alto voltaje que se utilice, también deberá producir una máxima amplitud de la señal en la cámara, sin que se presenten descargas.

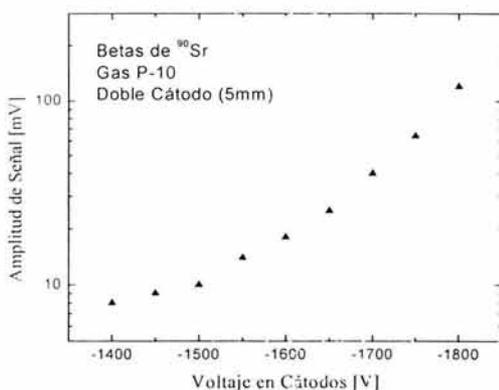


Figura 54. Curva de comportamiento para un detector proporcional con gas P-10.

Estos resultados se obtuvieron al tercer día de estar purgando el detector, pues no pudimos incrementar el voltaje más allá de -1800 V sin llegar a la región de descarga continua. Este comportamiento del detector se repitió con el gas CO_2 Ar, lo que significa que el detector aún no ha sido completamente purgado y, el proceso de acondicionamiento debe continuar. Al día siguiente intentamos realizar una nueva medición, obteniendo casi los mismos resultados que el día anterior.

Para evitar dañar los cátodos con las descargas producidas a voltajes mayores a los -1800 V, decidimos continuar con la purga del detector por unos días más. Diariamente se probó cuidadosamente el comportamiento del detector, notando que día a día podíamos incrementar el voltaje un poco más, sin entrar en la zona de descarga continua. Finalmente, encontramos que los valores obtenidos los días ocho y nueve eran similares, variando por menos de 5 mV cada uno. Con esto, probamos que el tiempo de acondicionamiento del detector se había completado, y que debe ser al menos de ocho días.

Los datos obtenidos el noveno día son los que se muestran en la tabla 5.2 y en la figura 55. El gas utilizado es el P-10. En la tabla 5.2 los datos terminan cuando se llega a -1900 V, pues a partir de ese valor, el detector permanentemente produce descargas de saturación.

Voltaje de cátodos [V]	Amplitud de la señal [mV]
-1400	-6
-1450	-8
-1500	-11
-1550	-12
-1600	-16
-1650	-24
-1700	-160
-1750	-900
-1800	-1200
-1850	-1600
-1900	-2200

Tabla 5.2 Datos obtenidos usando el gas P-10 con β 's con un detector bien purgado.

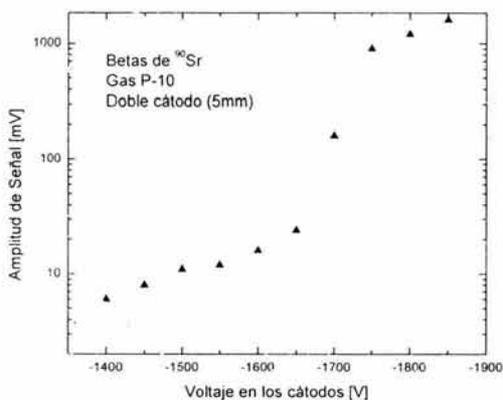


Figura 55. Curva de comportamiento para un detector proporcional con gas P-10, tras el período de acondicionamiento.

En la curva de la figura 55 graficamos la amplitud de las señales obtenidas por la cámara, utilizando Betas de ^{90}Sr como fuente de radiación. La relación entre el voltaje aplicado a los cátodos y la amplitud de las señales, debe guardar un comportamiento proporcional, pues buscamos que el factor de multiplicación M (que da origen al proceso de avalancha) sea constante [16]. En nuestro caso, nos interesa que el intervalo de voltajes en que nuestro detector pueda operar en esta región sea amplio, de manera que aseguremos una operación

estable del mismo, sin peligro de tener una vecindad muy cercana con la región de descarga continua.

De manera experimental, encontramos que entre -1650 V y -1750 V , se encuentra esta región de proporcionalidad. Así pues, el intervalo en que se podría trabajar con el gas P-10 sería de $-1650 \pm 50\text{ V}$. Podemos observar en la tabla 5.2 que después de los -1750 V , la amplitud de las señales crece al doble, por lo que no es recomendable trabajar en esta región, ya que se corre el riesgo de entrar en una región en que el detector opere en una región inestable entre la región de proporcionalidad y la región de descarga continua.

La elección del gas dependerá del intervalo en que se pueda trabajar en la región proporcional, siendo el criterio de elección el intervalo de trabajo. Se elegirá el gas que cuente con un mayor intervalo de trabajo. Las pruebas con el gas $\text{CO}_2\text{ Ar}$ arrojaron los datos que se muestran en la tabla 5.3 y se grafican en la figura 56. Es posible observar que, con este gas, el intervalo de trabajo es de 300 V y va desde -1700 V a -2100 V , que es donde los valores comienzan a dispararse.

En este caso, la curva es mucho menos pronunciada que la que se obtuvo con el gas P-10, por lo que se dispone de un mayor número de valores de alto voltaje en que se puede trabajar el detector. para obtener pulsos de gran tamaño. Por esta razón, se decidió que el gas con el que se trabajará es el $\text{CO}_2\text{ Ar}$ (20%, 80%). Cuanto mayor el tamaño del pulso obtenido, menor el riesgo de obtener pulsos que sean confundidos con el ruido del propio detector.

Voltaje de cátodos [V]	Amplitud de la señal [mV]
-1450	-5
-1500	-6
-1550	-8
-1600	-10
-1650	-13
-1700	-17
-1750	-30
-1800	-50
-1850	-90
-1900	-130
-1950	-200
-2000	-250
-2050	-360
-2100	-600
-2150	-800

Tabla 5.3 Datos obtenidos usando el gas $\text{CO}_2\text{ Ar}$ con β 's.

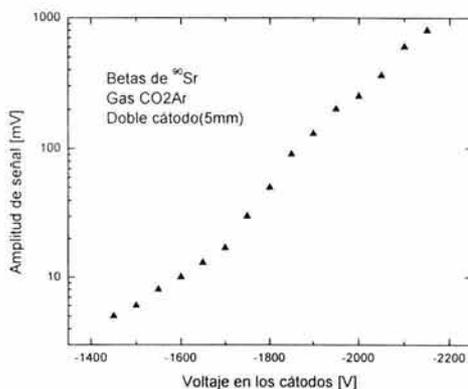


Figura 56. Curva de comportamiento para un detector proporcional, utilizando gas $\text{CO}_2\text{ Ar}$.

Al momento de realizar las mediciones, nos percatamos de que alrededor de los -2000 V , las señales, además de estar bien definidas, tenían amplitudes bastante aceptables. La elección del voltaje en que operará nuestro detector será de -2000 V , valor con el que se obtienen pulsos de gran amplitud y muy bien definidos. al tiempo que el detector opera de manera completamente estable. Pudimos trabajar a -2050 V o a -3000 V , que quizá nos hubiese dado una mayor amplitud de las señales, sin embargo, la amplitud de las señales que se tienen a -2000 V , son lo suficientemente grandes como para trabajar con voltajes mayores. Por seguridad, decidimos que el voltaje de operación fuera de -2000 V , pues es más seguro el trabajar con un menor nivel de voltaje.

5.5 Descripción de los pulsos.

Los pulsos que observamos en el osciloscopio y con los que buscamos las curvas de comportamiento antes descritas, son los que provienen de los preamplificadores 142C de Ortec. Como recordamos, estos preamplificadores sensibles a la carga, transforman la carga eléctrica en voltaje y le aportan una cierta ganancia a la señal que se forma, y de esa manera, podemos visualizar las señales generadas al interior de la cámara en instrumentos como un osciloscopio.

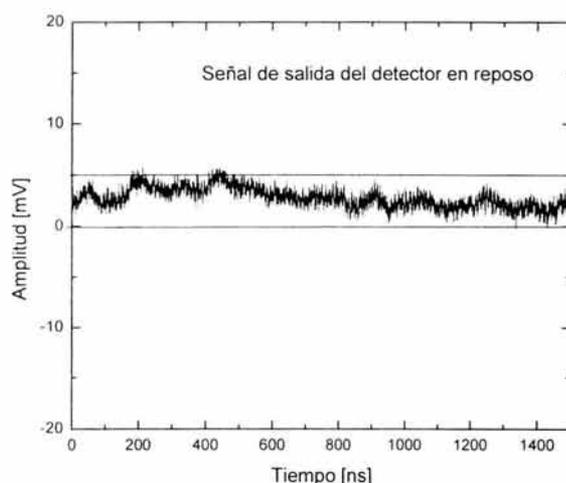


Figura 57. Ruido del detector cuando no se aplica voltaje.

Como punto de partida, hablaremos del nivel de ruido que es propio del detector. La señal que se debería observar en el osciloscopio antes de aplicar alto voltaje a los cátodos, sería únicamente la correspondiente a 0 V , puesto que no se colecta carga eléctrica en los ánodos

sin la ayuda de un campo eléctrico. Sin embargo, como en cualquier sistema, el ruido está presente y en nuestro detector no fue la excepción.

La señal que se obtiene de nuestro detector sin tener una fuente de ionización presente, ni alto voltaje en los cátodos, es la que se puede observar en la figura 57. El ruido que se observa, es menor a 5 mV, lo que es un buen indicio de partida. Confiamos en que al incrementar el voltaje, el nivel de ruido no aumente significativamente.

Las señales de ruido y la que corresponde a la detección de *Betas*, se tomaron una vez que el detector completó su periodo de acondicionamiento, lo que significa que en cualquier momento se puede repetir el experimento, y los resultados serán muy semejantes.

En la figura 58 aparece la señal que corresponde a la detección de *Betas* de la que hemos estado hablando. De acuerdo a nuestras predicciones, el nivel de ruido no es significativo. Éste llega a tener un valor de -20 mV, que comparado con los -300 mV que tiene el pico máximo de la señal, resulta tolerable. Como vemos, el rise time es menor a 4 ns, lo que justifica el hecho de que estemos trabajando con instrumentación electrónica para señales rápidas ($t_r < 5$ ns).

La señal de la figura se obtuvo con un valor de alto voltaje en los cátodos de -2000 V. En este caso, notamos que el pico máximo tiene una amplitud de casi -250 mV, valor que es casi al mismo que registramos para efectos de calibración en la tabla 5.3. La diferencia entre estos valores es tolerable y no varía más allá de un 10% cuando se repite la medición, en cualquier otra ocasión.

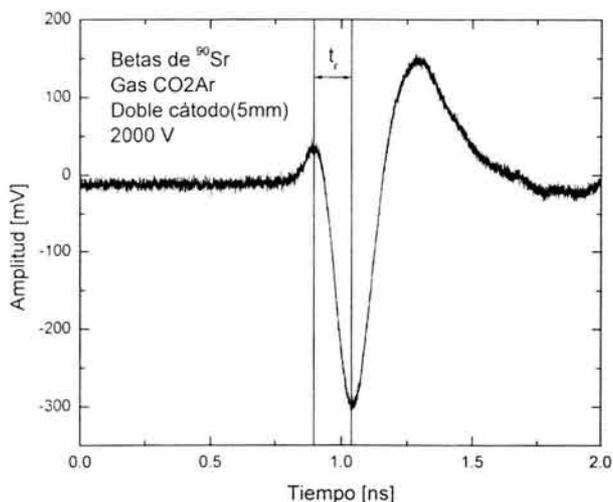


Figura 58. Pulso característico que se forma cuando se detectan partículas β .

Los pulsos generados por la detección de *Betas* se pudieron graficar gracias a una función de nuestro osciloscopio digital, que permite almacenar las señales que aparecen en su pantalla. Se guarda la señal en memoria, para luego digitalizarla y transformarla en un archivo tipo ASCII. Este archivo contiene la información correspondiente a cada punto que forma la señal, por lo que es posible graficarla en cualquier procesador de cálculo. En nuestro caso, utilizamos el programa Origin 6.0 para graficar las señales.

Como la fuente de radiación estuvo presente de manera permanente durante el tiempo que duraron las mediciones, la cámara multialámbrica pudo detectar todos los procesos de ionización que se produjeron en su interior, de modo que en el osciloscopio se podía observar una señal casi constante, aunque en realidad, cada pulso formado correspondía a la detección de un evento. En la figura 58 por ejemplo, el pulso que aparece es uno de los tantos que daban esa apariencia de una señal constante.

A diferencia de la fuente radiactiva, la frecuencia con que inciden los muones al detector es mucho menos frecuente, por lo que en vez de tener una señal aparentemente constante, la aparición de los pulsos es discontinua y escasa. Los pulsos generados por los muones son generalmente mucho más grandes en amplitud, pero conservan sus características de rise time y forma.

Otros pulsos que se pueden presentar cuando hacemos el seguimiento de nuestro detector en el osciloscopio, son los que se deben a las reflexiones. Cuando hablamos de la construcción del detector, mencionamos la importancia de que se tuvieran perfectamente acopladas las impedancias de todo el sistema. De especial importancia resulta que el acoplamiento en la cámara haya sido cuidadosamente realizado, ya que de lo contrario, el tener un mal acoplamiento dará como resultado reflexiones en la señal.

En nuestro caso, estas reflexiones aparecerían entre 40 y hasta 60 ns después de la señal original. Los 40 ns corresponden al tiempo que, de haberse producido la señal en el último alambre lateral, al llegar al preamplificador y encontrar un mal acoplamiento de impedancias, una parte del pulso sería reflejado hacia el otro preamplificador, por lo que recorrería la totalidad de la cadena de retraso (40 ns). El pulso reflejado aunque atenuado, al entrar al segundo preamplificador, provocaría la generación de una señal producto de una reflexión, pero que aparenta ser causada por ionización al interior del detector. Este tipo de señales son perjudiciales para nuestro sistema de adquisición de datos, porque pueden tomarse como señales válidas, cuando en realidad corresponden a una reflexión y no a un evento ionizante.

Es fácil identificar las señales producto de reflexiones, ya que además de estar atenuadas, tienen múltiples rizados, intercalando espacios en los que no hay señal. Sin embargo, para nosotros resulta fácil distinguirlas porque la forma que tienen se caracteriza por tener rizados y espacios entre dichos rizados. Por otra parte, un pulso debido a un evento ionizante, es únicamente un pulso que después de alcanzar el máximo, decae para llegar nuevamente a un nivel de cero.

El que los pulsos sean positivos o negativos tiene que ver exclusivamente con la polaridad del voltaje que se aplica en los cátodos.

5.6 Obtención de resultados.

Una vez que definimos el voltaje de operación de nuestra cámara multialámbrica, podemos pasar a la etapa de lectura del detector. En este momento, los pulsos han sido transformados en una señal digital, tras un proceso descrito en la sección 5.2.

Con la información digitalizada y con ayuda del MCA, tenemos que el conteo realizado por nuestra cámara multialámbrica será traducido en un histograma de frecuencias, en donde estarán repartidos en los 4096 canales del MCA, los tiempos de retraso cubren el total de nuestros alambres. Por lo tanto, obtendremos un espectro que debe tener una serie de picos bien separados, que representen al conteo en cada alambre.

Iniciamos la lectura del MCA utilizando β 's, porque como hemos mencionado, con ellas es mucho más rápida la obtención de resultados. La forma del espectro que apreciamos en la figura 59 es la obtenida utilizando la fuente radiactiva de ^{90}Sr , que colocamos en la parte central del detector a 32 cm de altura, con la intención de que la radiación colectada por nuestra cámara fuese lo más uniforme posible. El tiempo de adquisición con la fuente de ^{90}Sr en ésta y en las mediciones subsiguientes, fue de 30 minutos.

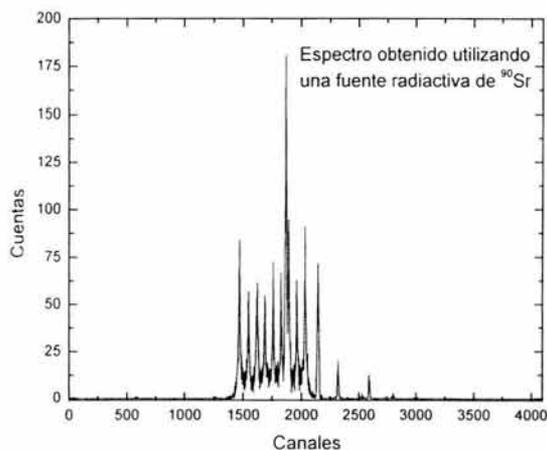


Figura 59. Primer espectro obtenido por el detector multialámbrico.

En este primer intento, notamos que están bien separados unos picos de otros, por lo que es posible encontrar bien definida nuestra estructura de alambre, aunque aparecen picos que no corresponden a ninguno de los alambres de nuestro detector.

Ya que del MCA observamos un espectro que representa la ocurrencia de eventos, es poco confiable el identificar a simple vista cuál de ellos se debe a una señal ruidosa o a una

generada tras la ocurrencia de un evento ionizante. Por esta razón, de los ajustes que se realicen antes de llegar al MCA dependerá la calidad de nuestro espectro.

5.7 Optimización.

En la figura 59 pudimos observar que nuestro espectro, en la parte derecha, presenta picos cuyas contribuciones se deben a las reflexiones que se dieron en la etapa que une la cámara multialámbrica y los preamplificadores sensibles a la carga. Estas reflexiones como decíamos, se deben a un mal acoplamiento de impedancias.

A pesar de la intención de lograr dicho acoplamiento, la aparición de esas contribuciones nos indican que el acoplamiento no fue perfecto. Sin embargo, es posible eliminar tales contribuciones ajustando los niveles de discriminación del módulo CF8000.

Para la obtención de nuestro primer espectro (figura 59), ajustamos el nivel de discriminación a -40 mV. Elegimos este valor dado que de las señales que se midieron cuando se buscaba la curva de comportamiento del detector con el uso de distintos gases, la magnitud del ruido era de -20 mV. Entonces, en el peor de los casos, pensando en que el nivel de ruido se llegara a duplicar, con un nivel de discriminación de -40 mV este valor de ruido sería eliminado. La figura 60 se hace una ampliación a la estructura de alambres que se mostró en la figura 59, mostrando los canales correspondientes a los picos debidos a reflexiones.

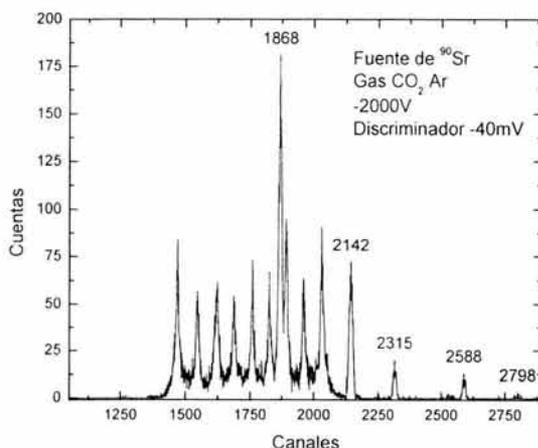


Figura 60. Espectro correspondiente a la detección de *Betas* con un nivel de discriminación de -40 mV.

Vemos que en este espectro existe un pico central cuya contribución sobresale del resto. Su contribución es mayor que la de los demás, porque corresponde a una señal originada por una reflexión. A final de cuentas, estos picos representan señales de ruido.

Los tres picos de la extrema derecha también son originados por reflexiones, por eso es que aparecen con una separación uniforme. Existen aproximadamente 274 canales de separación entre los picos que supusimos se debían a reflexiones, y ya que esta separación en canales es periódica, podemos asegurar que tales picos se deben a reflexiones. Como en cada reflexión son atenuadas, en el espectro vemos que cada vez su contribución decrece.

Ajustamos el nivel de discriminación en el CF8000 mediante un potenciómetro que se encuentra en la parte frontal del módulo. Con un desarmador especial, se gira hacia la derecha para aumentar el nivel o hacia la izquierda para disminuirlo. El nivel de discriminación es medido con un multímetro que se conecta en el punto de prueba del módulo, de manera que es posible revisarlo mientras se ajusta su valor con el potenciómetro.

Al incrementar este nivel de discriminación, ocurre que las señales que no superen dicho nivel, no serán tomadas en cuenta y por lo tanto, tampoco figurarán en el espectro. Incrementando el nivel de nuestro discriminador, esperamos observar que la contribución de las señales reflejadas disminuya, teniendo así, un espectro más limpio.

De manera experimental decidimos incrementar en -10 mV el nivel de discriminación, y observar los cambios que sufre el espectro. Con un nivel de discriminación de -50 mV, y bajo las mismas condiciones que las anteriormente usadas, obtenemos el espectro de la figura 61.

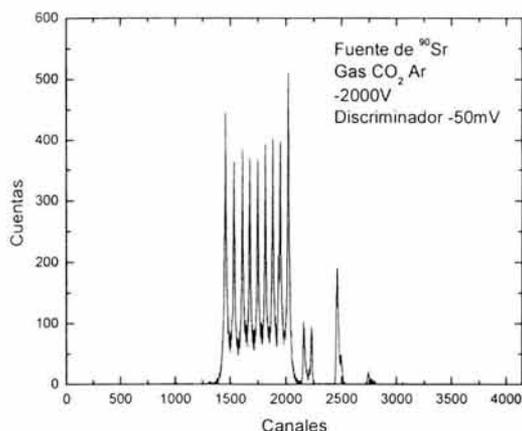


Figura 61. Espectro correspondiente a la detección de Betas con un nivel de discriminación de -50 mV.

Probamos con un nivel de discriminación de -60 mV, y efectivamente, las contribuciones de las señales de reflexiones disminuyeron, y por tanto, también disminuyó el pico que veíamos al centro, quedando ahora solamente un pico que no forma parte de nuestro detector. En la figura 62, de los picos que aparecen, el de la extrema derecha es el que corresponde a las señales que fueron reflejadas, también podemos ver que lo que en los espectros obtenidos con niveles de discriminación de -40 y -50 mV, aparecían otros picos en la parte derecha del espectro, que ahora han sido reducidos a unas pocas cuentas.

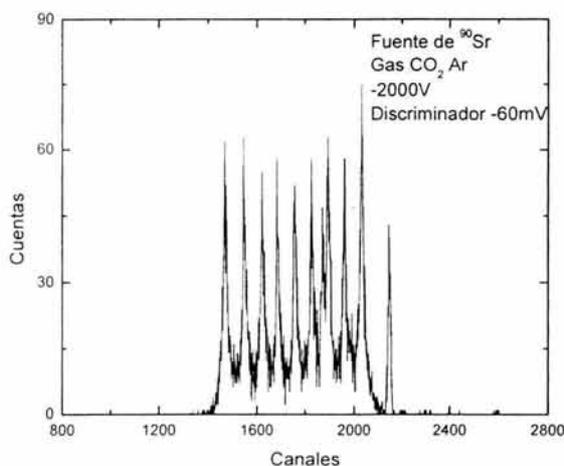


Figura 62. Espectro correspondiente a la detección de *Betas* con un nivel de discriminación de -60 mV.

No podemos trabajar con niveles de discriminación muy altos, porque eliminaríamos involuntariamente señales que correspondieran efectivamente a la ocurrencia de eventos ionizantes. Para el ajuste de los niveles de discriminación probamos distintos valores, de manera que, eliminando la mayor parte de señales indeseadas, no afectáramos a las señales que nos interesan.

De este modo, encontramos que con un nivel de discriminación de -80 mV, se eliminaba casi al 100% el problema de las señales indeseadas, sin afectar tampoco a las señales que fueron obtenidas por la detección de partículas β . El espectro que aparece en la figura 63 ha sido graficado en sus 4096 canales, para demostrar que efectivamente, el problema del ruido fue eliminado. Más adelante haremos un acercamiento al espectro, para resaltar la estructura de alambres que se forma.

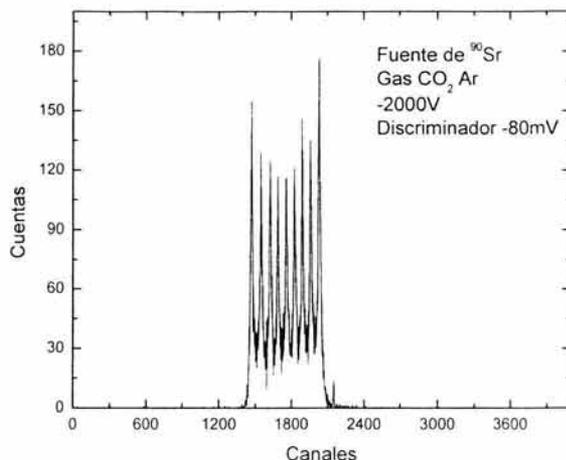


Figura 63. Espectro correspondiente a la detección de *Betas* con un nivel de discriminación de -80 mV.

Hasta el momento hemos asegurado un buen funcionamiento de nuestra cámara detectando β 's desde una posición fija, sin embargo, desconocemos su sensibilidad para percibir los cambios en la dirección con que llegue la radiación incidente. Una manera de comprobar esta sensibilidad, es puntualizar el flujo de radiación incidente, de manera que sea posible radiar sólo una parte del detector [23]. Los resultados deben arrojar un espectro que tenga mayor número de cuentas en la parte radiada, mientras que en el resto del detector la detección será menor, y por ello, será menor el conteo.

Para concentrar el flujo de partículas β utilizamos un colimador, que es una pieza de plomo que tiene al centro un pequeño orificio por donde pasará libremente el flujo de partículas, mientras que en el resto del colimador, las partículas serán frenadas por el plomo del que está hecho.

Ya que gran cantidad de radiación es detenida por el colimador, lo colocamos junto con la fuente radiactiva, de manera directa sobre el detector en tres distintas posiciones: a la izquierda, al centro y a la derecha. Como referencia, tomamos el circuito integrado de la línea de retraso.

En la figura 64 junto con el espectro correspondiente, vemos la forma en que colocamos la fuente radiactiva. Es notorio que la mayor tasa de conteo fue registrada en la parte izquierda del detector, por lo que el primer pico de izquierda a derecha es el de mayor altura. Sin embargo, se observa que se forma la estructura de alambres en el espectro, lo que significa que la cámara tiene funcionando todos sus alambres.

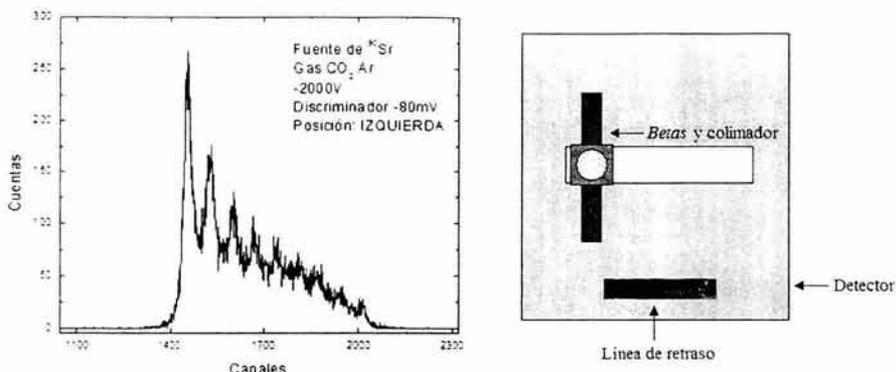


Figura 64. Espectro correspondiente a la detección de *Betas* cuando la fuente se colocó en la parte izquierda del detector. La imagen de la derecha muestra la forma en que se colocó la fuente.

De la misma forma en que colocamos la fuente anteriormente, ahora la situamos al centro del área activa del detector (ver figura 65). Observamos que la mayor contribución se presentó en la parte central del espectro; la forma curvada que presenta se debe a que la mayor cantidad de cuentas las aportaron los alambres centrales, que fueron los que recibieron la mayor cantidad de radiación, mientras que los alambres de los extremos no fueron radiados por la fuente radiactiva con la suficiente intensidad como para influir significativamente en el espectro.

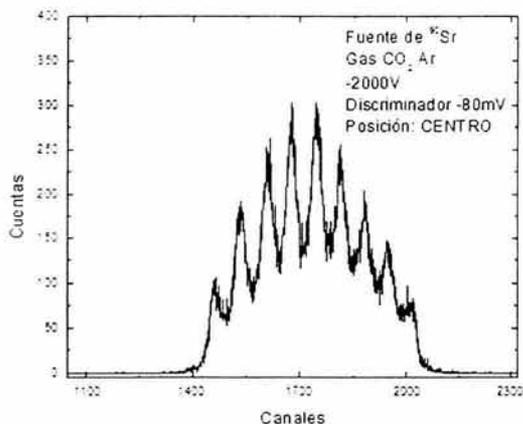


Figura 65. Espectro correspondiente a la detección de *Betas* cuando la fuente se colocó al centro del detector.

Los resultados que obtuvimos al colocar la fuente en la parte derecha del área activa del detector se muestran en la figura 66. Al igual que cuando la fuente se colocó en el otro extremo, la mayor detección se dio en la parte más cercana a la fuente radiactiva, por lo que los picos son más altos en esa sección.

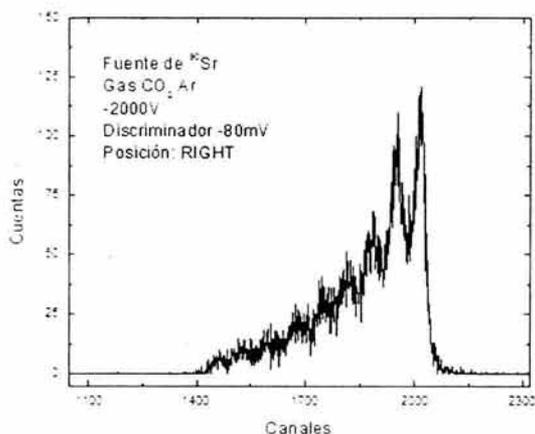


Figura 66. Espectro correspondiente a la detección de *Betas* cuando la fuente se colocó en la parte derecha del detector.

Con estos resultados, podemos afirmar que la cámara multialámbrica podrá detectar a los muones que incidan en ella en toda su superficie, y gracias al análisis del MCA, podremos identificar el comportamiento de cada uno de los alambres, de modo que dicha información sea útil para la reconstrucción de trayectorias.

Cabe resaltar que en las mediciones realizadas con colimador, los picos no se encuentran tan bien definidos como cuando la fuente se colocó 32 cm encima de la cámara. Para este caso, la principal causa de la mala separación entre picos, es la gran cantidad de β 's que inciden simultáneamente en la cámara, por lo que ocurre que llegan a incidir más de una partícula en un mismo alambre, o que ionizan el entorno de dos alambres al mismo tiempo.

Las limitaciones de la instrumentación electrónica en cuanto a la velocidad con que puede procesar la información producto de un evento ionizante, son las que se traducen en registros de eventos desfasados que en el espectro se observan como la parte gruesa de los picos. En concreto, el discriminador es quien arroja una serie de pulsos cuadrados por evento, cuando debiese generar uno solo. Esto se debe a que se está trabajando en sus límites de operación, por lo que no responde de manera adecuada ante la gran demanda para procesar señales. Sin embargo, bajo estas condiciones, también se está llevando al límite de operación al resto de la instrumentación, por lo que los errores que se generen en ellos también se verán traducidos en una mala separación entre alambres.

5.8 Linealidad y Resolución espacial.

Linealidad

Para conocer el sitio en el que una partícula ionizante incide en el detector, es necesario que el retraso de tiempo inducido a las señales colectadas en los alambres sea uniforme. En el espectro, esto se refleja teniendo los picos bien separados uno del otro y a una distancia constante, lo que nos permite ubicar el alambre más cercano al lugar de la incidencia, pues corresponderá al pico más alto del espectro. Si garantizamos un retraso de tiempo constante entre alambre y alambre, podremos a su vez, garantizar la correcta ubicación del sitio en que inciden las partículas ionizantes, es decir, podemos asociar tiempo con espacio.

Comprobamos que el retraso de tiempo entre alambres de nuestra cámara es lineal, cuando graficamos la separación que existe (en canales) entre cada una de las señales proporcionadas por los alambres, y la comparamos con un ajuste lineal que se hace a la recta. Del espectro de la figura 63, se obtiene la ordenada y la abscisa de cada uno de los picos, y con esos datos se hace la gráfica. En la figura 67 están representados por los triángulos.

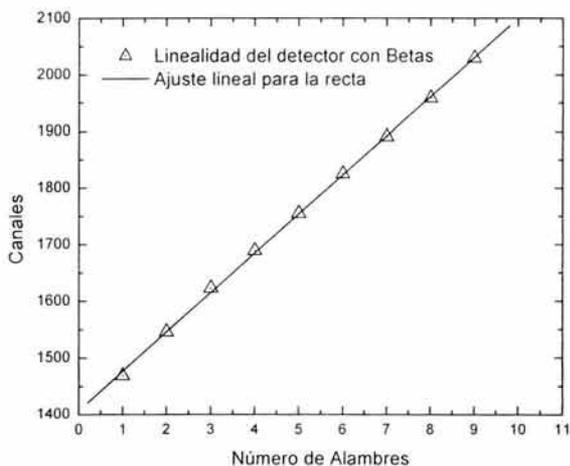


Figura 67. Comportamiento lineal de las líneas de retraso de la cámara multialámbrica con Betas.

Como podemos apreciar en la gráfica de la figura 67, los triángulos representan los alambres del detector y su relación con la separación entre canales del MCA. Cuando se hace el ajuste de la recta, podemos observar que la variación de los triángulos y la recta es casi nula. Para este ajuste, de Origen 6.0, obtuvimos un coeficiente de correlación de 0.99973, que significa que la relación lineal entre los canales y la posición correspondiente a las señales de cada alambre es muy fuerte.

Lo anterior significa que podemos confiar en que el retraso de tiempo entre alambre y alambre es constante, por lo que podemos asumir que la separación en canales entre los picos del espectro, corresponde a la separación de 5 mm que existe entre los alambres. Hecha esta aclaración, podemos calcular la resolución espacial de nuestro detector.

Resolución espacial

Hemos comprobado que el comportamiento temporal de nuestro detector multialámbrico nos permite relacionar tiempo con espacio, dada la linealidad que existe entre estos parámetros. Para obtener la resolución espacial de nuestra cámara multialámbrica, definiremos la *semi-anchura (FWHM Full Width at Half Maximum)* de nuestro espectro. De la figura 68, definimos la semi-anchura de una distribución como el espacio que ocupa cuando se toma la mitad de su máxima amplitud.

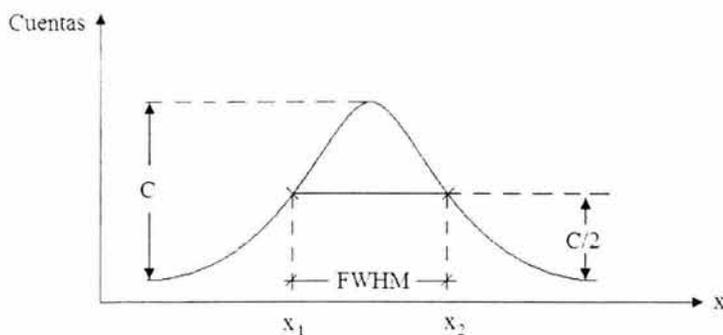


Figura 68. Obtención de la semi-anchura.

La resolución del pico es:

$$p = \pm \frac{FWHM}{2.33}, \quad \text{donde } FWHM = x_2 - x_1$$

En física de altas energías es común utilizar el término de resolución espacial (en este tipo de detectores) para referirse al comportamiento estadístico que tienen los picos del espectro, es decir, cuantificar el traslape existente entre cada una de las distribuciones o picos. Regularmente se asume que las distribuciones son de tipo gaussiano, por lo que σ es utilizada para este fin.

Del espectro que obtuvimos con un nivel de discriminación de -80 mV (ver figura 69), conocemos que la separación entre pico y pico es casi constante, y que a su vez

corresponde con los 5 mm de separación entre los alambres del ánodo. La separación en canales entre pico y pico es, en el peor de los casos, de 66 canales.

Se hace referencia al peor de los casos, porque se tienen registradas separaciones de 77 canales. La diferencia entre los valores de 66 y 77 canales se debe, principalmente, al error intrínseco que proporciona el circuito integrado de la línea de retraso que es del 5% según los datos del fabricante, aunque existen otros factores que puede mejorar la definición de los picos, como son: uniformidad de los cátodos, separación constante entre alambres y tener la misma separación entre ánodo y cátodos.

Los valores de los picos se encontraron con ayuda de una herramienta especial de la hoja de cálculo en donde se graficó el espectro (Origin 6.0), de manera que para encontrar la semi-anchura, primero se localizó la abscisa del pico, para así encontrar su ordenada. El valor de la ordenada se dividió a la mitad, y con este valor se buscó su abscisa correspondiente antes y después del pico. Al encontrar los dos valores de las abscisas, se encontró la semi-anchura restando las abscisas de la forma $x_2 - x_1$.

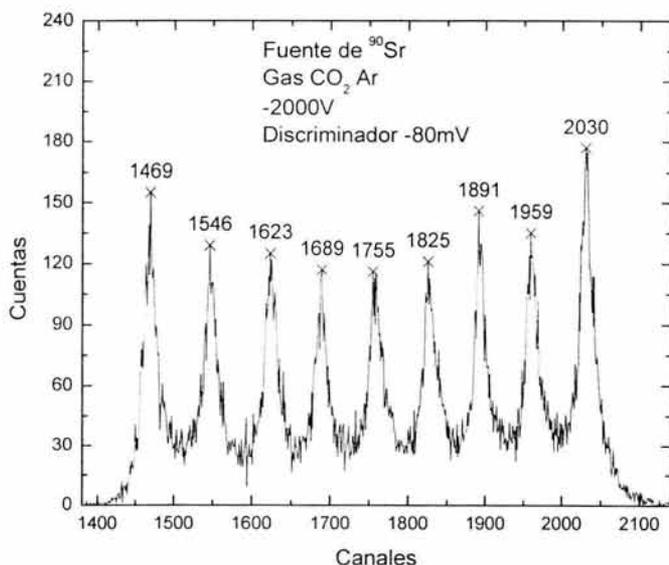


Figura 69. Estructura de alambres del espectro correspondiente a la detección de *Betas* con un nivel de discriminación de -80 mV.

Con los datos del espectro obtenido para un nivel de discriminación de -80 mV que mencionamos anteriormente, encontramos que la resolución espacial es:

$$p = \pm \frac{\text{distancia entre alambres} \times FWHM}{\text{separación entre picos}} = \pm \frac{5 \text{ mm} \times 21 \text{ canales}}{66 \text{ canales}}$$
$$\Rightarrow p = \pm 1.59 \text{ mm}$$

Se tomó la separación entre picos como 66 canales por ser la distancia de menor valor, que representa la resolución en el peor de los casos. Si se calcula el valor para una separación de 77 canales entre picos, el valor mejora dos décimas de milímetro.

5.9 Caracterización de las cámaras.

Los resultados que hasta ahora hemos obtenido han sido en base a la detección de partículas *Beta*, y con ellas hemos podido ajustar parámetros como niveles de discriminación y voltaje de operación, con los que nuestra cámara multialámbrica ha demostrado trabajar satisfactoriamente. En la sección 5.4 explicamos que una vez calibrado el detector con la ayuda de las partículas β , se tendrían que realizar unas pequeñas modificaciones en la calibración del detector para conseguir la detección de muones.

Estas modificaciones son en primera instancia, el tiempo de adquisición de datos, que ahora pasará de minutos a horas. tomando en cuenta de que mientras mayor sea el tiempo de adquisición, tendremos un espectro más representativo. La fuente radiactiva de ^{90}Sr ya no será utilizada, puesto que ahora detectamos muones.

En la figura 70 se aprecia la forma en que se dispuso la cámara multialámbrica y los dos detectores de centelleo, para la detección de muones. La distancia entre centelleadores (verificadores de eventos) es de 22 cm, quedando en medio la cámara multialámbrica.

Tras dos horas de conteo con esta disposición, el espectro que observamos contenía poca estadística, e incluso era difícil apreciar que se formara la estructura de alambre en el MCA. El resultado de este espectro era un puñado de puntos, que no lograba definir una forma o un patrón de comportamiento. Con este resultado, comprendimos que el tiempo de adquisición necesario para tener un espectro claro, sería de muchas más horas. Iniciando en la mañana, monitoreamos la adquisición de datos correspondientes al paso de muones por la cámara a lo largo del día y así, fuimos observando que poco a poco, el espectro comenzaba a tomar forma.

El espectro que se muestra en la figura 71, se obtuvo tras 24 horas de conteo. Podemos notar que los picos están muy bien definidos, y que la separación entre canales también está bien definida. La obtención de este espectro representó todo un reto, pues nuestra cámara no había trabajado de manera continua más de dos horas. El riesgo que representaba el que se produjese una descarga que dañara algún alambre y pudiera causar un corto circuito en la

cámara, en un momento en que no estuviera bajo supervisión, fue nuestra mayor preocupación.

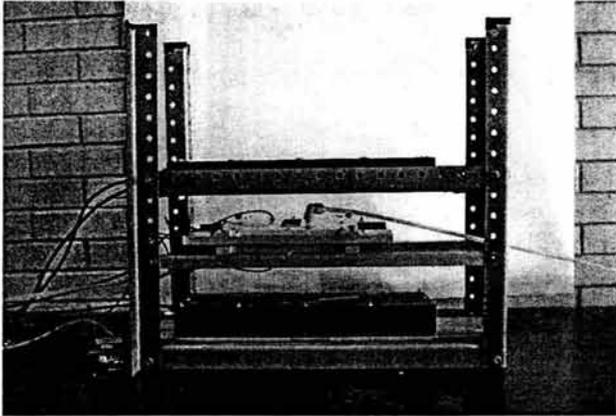


Figura 70. Disposición del sistema de detección, con el que se registró el conteo de muones.

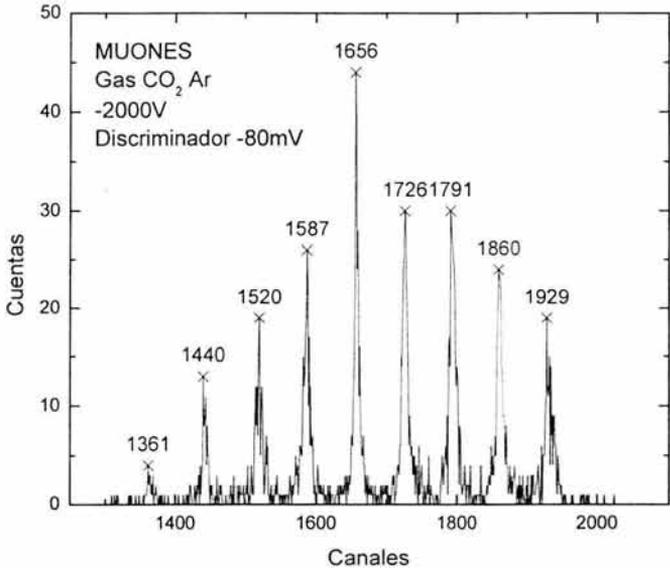


Figura 71. Espectro correspondiente a la detección de muones, tras 24 horas de conteo.

Los resultados que vemos en este espectro incluso son mejores que los obtenidos para la detección de β 's, pues notamos picos muy bien definidos, así como un ruido muy bajo entre pico y pico. El pico de la extrema izquierda es el que tuvo un comportamiento poco eficiente, sin embargo, aún así es posible determinar la posición del pico. La razón del bajo conteo registrado por este pico, se debe a la geometría de los detectores de centelleo. En un punto mencionamos que los detectores de centelleo tienen un área activa de 57 cm^2 , mientras que el área activa de nuestra cámara multialámbrica es de 100 cm^2 . Además, la geometría de los centelleadores es de un trapecoide, por lo que uno de sus lados es menor al resto. Ya que utilizamos a los detectores de centelleo como verificadores de eventos, una parte de los muones que incidan en el detector no serán validados por los centelleadores, porque simplemente no los atravesarán (recordemos que su área es menor). Retomando la pequeña contribución del primer pico del lado izquierdo en la figura 71, ésta corresponde a la región en que el lado pequeño de los centelleadores quedó orientado sobre la cámara multialámbrica.

Como se ha dicho, no todos los muones inciden con cero grados respecto a la vertical, y ha sido posible medir la incidencia de muones en nuestra atmósfera con 45° respecto a la vertical, aunque en mucho menor cantidad que los muones que inciden con 0° [22]. También se mencionó que en ocasiones llegan chubascos de muones, sin que se pueda predecir la cantidad ni la frecuencia con que aparecerán. Suponiendo que el área activa de los centelleadores sea la misma que la de la cámara multialámbrica, debido a los muones que acabamos de describir, se puede tener que la cámara multialámbrica detecte una mayor cantidad de muones en su parte central, ya que en el peor de los casos, los muones que incidan con ángulos de 45° respecto a la vertical serán vistos por los alambres centrales de la cámara (ver figura 72), de manera que las cuentas registradas al centro de la cámara, serán ligeramente mayores a las de los extremos.

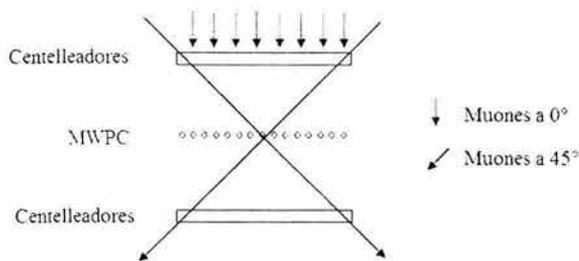


Figura 72. Los muones que inciden en el detector con ángulos de 45° , aunque en menor cantidad, contribuyen al conteo de la parte central del detector.

A pesar de que el pico más alto tiene una contribución de aproximadamente 45 cuentas, comparadas con las casi 180 que constituyen el pico más alto para el espectro de la figura 69, el espectro correspondiente a la detección de muones es mucho más "limpio". Se debe a que en este caso, homogeneizamos la referencia de tierra de todo el equipo electrónico.

Nos percatamos de que la cámara multialámbrica es muy sensible a la radiación de fondo, así como a las señales electromagnéticas que rodean el laboratorio donde trabajamos. La solución que encontramos para el segundo caso, fue el unir todas las referencias de tierra del sistema, para evitar problemas de tener tierras "flotadas"²², y el enrollar los preamplificadores 142C Ortec en malla de alambre, a modo de formar una jaula de Faraday. El resultado, un nivel de ruido de -4 mV en las señales provenientes del preamplificador 142C Ortec y consecuentemente un espectro muy uniforme, a pesar de tener una tasa de conteo baja.

Como mencionamos, se analizaron los espectros a lo largo de varias horas. Fue con el nivel de discriminación de -80 mV, con que veníamos trabajando, con el que obtuvimos los mejores resultados. Durante los días que operó de manera continua, corroboramos que en la cámara no se presentaron descargas eléctricas²³, comportándose en todo momento de manera estable, lo que nos indica que el valor de voltaje de operación que elegimos es correcto. En caso de que se hubiesen presentado descargas de manera frecuente, habría sido necesario el modificar el valor del voltaje de operación. Los espectros que se obtuvieron en esos días, no difieren más allá del 5% respecto al presentado en la figura 71.

A pesar de que de manera inicial tenemos espectros muy bien definidos, aún no conocemos qué tan lineal es la relación que guardan el tiempo de retraso y la posición de los alambres. Con los datos de la figura 71, elaboramos la gráfica de la figura 73, que representa la linealidad de las posiciones de la cámara.

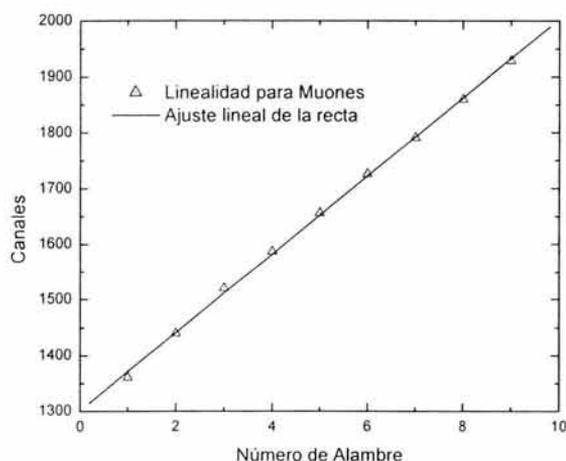


Figura 73. Comportamiento lineal de las líneas de retraso de la cámara multialámbrica con muones.

²² Que la referencia entre ellas es distinta de cero.

²³ Las detectamos porque, al momento de ocurrir, es posible escuchar la chispa.

De Origin 6.0, al hacer el ajuste a la recta tenemos un factor de correlación de 0.99957, que como previamente se explicó, nos da la seguridad de afirmar que la relación entre la separación en canales del MCA, puede ser interpretada como una distancia de 5 mm.

Para conocer la resolución de nuestra cámara multialámbrica cuando detecta muones, tomamos las mismas consideraciones que cuando lo hicimos para la detección de β 's. En este caso, la semi-anchura de los pulsos resultó ser de 6 canales, mientras que la separación entre ellos fue de 69 canales. La obtención de estos canales se hizo con las herramientas de Origin 6.0.

La separación entre alambres sigue siendo de 5 mm, por lo que al hacer el cálculo para obtener la resolución p , tenemos:

$$p = \pm \frac{5 \text{ mm} \times 7 \text{ canales}}{69 \text{ canales}}$$

$$\Rightarrow p = \pm 0.5 \text{ mm}$$

Es claro que la resolución obtenida con muones es mucho mejor que cuando se detectaron betas, y en gran parte se debe a la dirección con que inciden los muones en la cámara. Recordemos que aunque algunos muones inciden con ángulos mayores a 45° , la gran mayoría incide verticalmente, por lo que no se presenta el problema de tener señales generadas en más de un alambre, al paso de una misma partícula, como ocurrió cuando se utilizó la fuente de ^{90}Sr con el colimador.

6. Conclusiones y futuro.

Aunque el principio de funcionamiento de una cámara multialámbrica proporcional es sencillo, su construcción y puesta en operación no lo es tanto. La dificultad de la construcción de estas cámaras reside, principalmente, en que los principios considerados son totalmente teóricos y se considera que los materiales son ideales. Sin embargo, el lograr esa idealidad se torna el principal reto a vencer, pues se tienen que compensar las imperfecciones de los materiales o elementos que se involucran durante la construcción y operación de las cámaras multialámbricas.

Al haber concluido satisfactoriamente las pruebas de detección de muones con nuestra cámara multialámbrica, hemos comprobado que la mayoría de las consideraciones tomadas durante el diseño y la operación del detector fueron adecuadas. Con este trabajo sentamos las bases de lo que será la construcción del detector de tamaño 100 veces mayor al nuestro, por lo que se deberán tomar algunas consideraciones extras a las que hicieron exitosa la operación de nuestro prototipo, y que mencionaremos en un momento.

Por principio de cuentas, es de suma importancia que el tiempo de acondicionamiento de la cámara sea de al menos ocho días, y que se complete antes de comenzar a registrar mediciones, ya que de lo contrario se tendrán comportamientos inestables del detector que pueden resultar en mediciones erróneas, o en el daño de la cámara por las descargas que se producen en este período.

Encontramos que el voltaje de operación con gas CO_2 Ar para una cámara como la nuestra, es de -1650 ± 50 V, llegando a la saturación en los -2100 V, a partir del cual se producen descargas continuas al interior de la cámara. Por otra parte, con el gas P-10 se tiene que el voltaje de saturación es de -1900 V, mientras que el voltaje al que podría operar, se encuentra alrededor de los -1800 ± 50 V. La cercanía del voltaje de operación y del voltaje de saturación hacen que este gas sea poco confiable para operar de forma segura. La elección del gas CO_2 Ar se debió a que presenta un comportamiento más estable que el P-10, a la vez que es menos inflamable. Esta consideración resulta importante debido al lugar en que trabajará el detector grande.

En la figura 71 pudimos constatar que los nueve alambres que se conectaron a la línea de retraso aparecen en el espectro perfectamente separados, y se encontró que el comportamiento de este tiempo de retraso es correspondiente a la separación física que existe entre cada alambre, y que en nuestro caso fue de 5 mm. Con esto podemos afirmar que nuestra cámara multialámbrica permitirá obtener espectros con los que sea posible determinar la posición en que incidan los muones.

Los picos cuya contribución sea mayor, representarán el lugar del detector en que los muones incidieron en mayor cantidad. Esto es importante porque el sistema de detección que se colocará bajo la Pirámide del Sol, tiene la tarea de identificar la posible existencia de un hueco en su interior. De existir, estos huecos serán representados en los espectros como picos, cuya contribución deberá ser notoriamente superior al resto.

El valor de resolución que obtuvimos para la detección de muones fue de 0.5 mm, lo cual significa que si hacemos $\rho = \sigma$, y considerando que la distribución de los picos es gaussiana, tendremos que sólo un 5% de los eventos registrados en cada pico, corresponderán a eventos originados en un alambre vecino, y no en el alambre asociado a dicho pico. Lo anterior significa que cuando se detecten muones, el espectro que resulte de la medición indicará con total precisión, la región en que los muones incidieron con mayor frecuencia a la cámara. Esta característica resulta vital para el detector de 1 m².

Los elementos que deben tomarse en cuenta para la construcción de la cámara grande, son los que se mencionan a continuación:

- *Acoplamiento de impedancias:* Este factor resulta clave al momento de adquirir las lecturas de nuestra cámara, pues comprobamos que de no contar con un buen acoplamiento de impedancias, las reflexiones de señal que se presentan pueden afectar significativamente las mediciones. En nuestro caso, con las resistencias de acoplamiento no se logró anular completamente las reflexiones, aunque para eliminar las contribuciones debidas a reflexiones de la señal, bastó con ajustar los niveles de discriminación del módulo CF8000.
- *Alambre:* Parte medular de una cámara multialámbrica son los alambres que la conforman. Por las dimensiones de nuestra cámara prototipo, no tuvimos mayores problemas con la tensión aplicada a los alambres para lograr colocarlos en un mismo plano. Debido a que en la cámara de tamaño real la distancia que cubrirán será de 1 m, es muy probable que el valor de tensión se incremente, para evitar que se presente una catenaria en los alambres. De aquí la importancia de haber elegido el alambre de tungsteno-oro de 25 μm . Este alambre tiene la característica de ser muy resistente a pesar de su diámetro, sin embargo, no podía ser totalmente de tungsteno, porque este metal no es fácil de soldar con la soldadura de estaño plomo. Sin embargo, la cubierta de oro que tiene este alambre soluciona el problema de soldadura.

Se descubrió que el empleo de un alambre maltratado provoca descargas eléctricas que además de dañar el alambre, dañan el cátodo en la zona en que se da la descarga. La causa de las descargas es que en la parte defectuosa, se colecta una importante cantidad de electrones a causa del efecto punta que se origina en la zona. Por lo tanto, se deberá supervisar que esté libre de defectos antes de soldarlo, y en caso de encontrar alguna irregularidad en su superficie, desecharlo sin importar cuan pequeña sea la imperfección. En caso de omitir esta recomendación, es seguro que ese alambre dará problemas y en poco tiempo será necesario cambiarlo,

- *Aislamiento electromagnético y referencia de tierra:* Encontramos de manera experimental, que si se aíslan los preamplificadores 142C Ortec dentro de una Jaula de Faraday, el ruido en las señales que salen de ellos se atenúa de manera considerable. También nos percatamos de que el hecho de unir todas las referencias de tierra del sistema en un solo punto, reduce la cantidad de ruido del sistema, dado

que no toda la instrumentación empleada utiliza la misma referencia de potencial cero. Por esta razón, recomendamos hacer que todos los elementos que tengan que ver en la instrumentación, así como la estructura de la cámara multialámbrica, estén referidos al mismo potencial cero.

- *Aislamiento eléctrico:* Con el propósito de evitar descargas eléctricas entre los cátodos y la estructura de aluminio de la cámara, se utilizó una cinta aislante capaz de soportar más de 3 kV, sin que se vea afectada. Su nombre comercial es Kapton y adicionalmente, tiene la ventaja de no despedir gases que contaminen la atmósfera al interior de la cámara multialámbrica.
- *Cátodos:* Además de ser totalmente lisos, deberán colocarse en un mismo plano y con la misma separación respecto del ánodo. El tener cátodos de superficies imperfectas hace más fácil el que se presenten descargas eléctricas al interior de la cámara, aunque no se haya llegado al voltaje de operación. Por otra parte, el que no se coloquen en un mismo plano, o que la distancia entre ánodo y cátodos no sea la misma, resulta en espectros con picos más altos que el resto, sin que ello obedezca a una mayor incidencia de partículas ionizantes en los alambres correspondientes a tales picos.
- *Circuito impreso:* Utilizando la máquina Protomat C60 y FR4 como materia prima, logramos un circuito impreso de alta calidad que además de ser resistente a la deformación por elaborarse de manera mecánica, no sufrió alteración alguna en su superficie de cobre hasta el momento de soldar los alambres.

La elaboración del circuito impreso para la cámara grande deberá realizarse con la misma máquina, para garantizar que la tableta conserve todas sus características mecánicas y eléctricas intactas hasta antes de soldar, lo que permitirá que la unión entre alambres y cobre sea más fuerte. Como se mencionó, es probable que se modifique la tensión en los alambres, por lo que será necesario incrementar el número de puntos de soldadura que sujeten al alambre. Es recomendable que los alambres se suelden en al menos dos puntos en cada uno de sus extremos.

- *Estructura:* La estructura mecánica de nuestro prototipo resultó ser lo suficientemente rígida para garantizar que la distancia entre cátodos sea uniforme, y que el marco al que van sujetos los alambres del ánodo no se deformó, por lo que la tensión en los alambres se conservó uniforme. La desventaja de esta estructura es que no estamos seguros de que se puedan maquinar las tapas de la cámara de 1 m² con la facilidad y exactitud con la que se hizo con las tapas de nuestro prototipo. En tal caso, será necesario buscar una solución que garantice que los cátodos que queden sujetos a las tapas, queden completamente paralelos.
- *Gas:* El gas CO₂ Ar es el elemento sin el cual no se tendría un buen conteo de muones bajo las condiciones que operamos nuestro prototipo. Probó tener un comportamiento adecuado además de permitir lograr una buena proporcionalidad en la operación de nuestra cámara, aunque no es el gas ideal que se buscaba. Como punto de referencia para la cámara de tamaño real, se tendrán que modificar los

puntos de entrada y salida del gas, ya que en nuestro detector, sólo se cuenta con una entrada y una salida, además de estar colocadas de forma perpendicular a las tapas de la cámara. Esta disposición no resultó problemática, por el tamaño de nuestro prototipo, pero estamos conscientes de que la distribución del gas no es muy uniforme por la forma en que entra el gas a la cámara.

Se propone que la salida del gas siga siendo una sola, y que en ella se utilice un burbujeador, que evite que el interior de la cámara se llene con otro gas que no sea el de CO₂ Ar, cuando el flujo de gas sea suspendido. El propósito es conservar la cámara llena de gas todo el tiempo, hecho que evitaría repetir el proceso de purgado que se describió anteriormente, con lo que se ahorraría una cantidad considerable de gas. Se deben tener más de una entrada de gas y deben colocarse de forma paralela a los cátodos, para evitar turbulencias y garantizar que el interior de la cámara se llene de gas de manera uniforme.

- *Líneas de retraso:* Ya que el detector de tamaño real está pensado para que tenga 200 alambres, se requerirán de 20 líneas de retraso. A pesar de que la distorsión reportada por la compañía que las fabrica, después de 20 etapas de retraso, se deberá corroborar que el pulso generado en el ánodo de la cámara es adecuado para su manejo. En caso de que no sea así, se deberán idear nuevas formas de leer el detector.
- *Soldadura:* A pesar de existir en el mercado soldaduras de estaño plata cuyos vapores son mucho menos nocivos, la calidad de la soldadura conseguida fue muy buena, por lo que el precio de la soldadura de estaño plata no amerita su empleo.

Hemos comprobado que en la construcción de una cámara multialámbrica todos los elementos involucrados juegan un papel importante y que de cada uno de ellos depende que el otro funcione adecuadamente. Es muy fácil acumular errores durante el proceso de construcción, que por separado puedan parecer tolerables, pero que en conjunto, resultarán en una cámara multialámbrica con la que sea difícil la detección de muones.

La formación de un ingeniero está estrechamente relacionada con la ciencia, siendo la parte que logra la consecución de un proyecto que parte de bases completamente teóricas, tomando en cuenta las dificultades que eso conlleva. Gracias a la formación recibida durante la carrera de ingeniero electrónico, fue posible el lograr un muy buen funcionamiento de la cámara multialámbrica. El poder superar los problemas que representaba el hecho de tener consideraciones de tipo ideal, en gran parte se debió a la capacidad de resolver problemas, desarrollada durante mi formación.

APÉNDICE 1 HOJAS DE ESPECIFICACIONES

➤ LÍNEA DE RETRASO SIP5-405

SIP5 Series 10-Tap High Performance Passive Delays

- Fast Rise Time, Low DCR
- High Bandwidth $\approx 0.35/\tau$
- Low Distortion LC Network
- 10 Equal Delay Taps
- Standard Impedances: 50 - 75 - 100 - 200 Ω
- 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 Ω min. @ 100VDC
Temperature Coefficient	100 ppm/°C, typical
Bandwidth (f _c)	0.35 τ , approx.
Operating Temperature Range	-55° to +125°C
Storage Temperature Range	-85° to +150°C

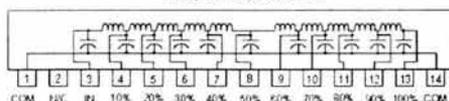
Electrical Specifications at 25°C

Delay Tolerance		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)
Total (%)	Tap-to-Tap (%)												
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	9.6	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
35 ± 1.75	3.5 ± 0.8	SIP5-355	6.6	1.2	SIP5-357	7.2	2.0	SIP5-351	7.3	2.2	SIP5-352	13.0	2.5
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
45 ± 2.25	4.5 ± 1.0	SIP5-455	8.2	1.3	SIP5-457	8.2	2.1	SIP5-451	8.3	2.3	SIP5-452	15.2	3.1
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
55 ± 2.75	5.5 ± 1.0	SIP5-555	10.2	1.4	SIP5-557	11.2	2.2	SIP5-551	11.4	2.4	SIP5-552	16.0	3.5
60 ± 3.0	6.0 ± 1.5	SIP5-605	10.5	1.4	SIP5-607	11.4	2.2	SIP5-601	11.5	2.5	SIP5-602	16.2	3.6
70 ± 3.5	7.0 ± 1.5	SIP5-705	11.0	1.7	SIP5-707	13.0	2.6	SIP5-701	13.0	2.8	SIP5-702	17.0	3.7
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
80 ± 4.0	8.0 ± 1.8	SIP5-805	12.0	1.9	SIP5-807	15.3	2.9	SIP5-801	15.5	3.0	SIP5-802	19.5	4.0
90 ± 4.5	9.0 ± 2.0	SIP5-905	14.0	2.0	SIP5-907	17.3	3.0	SIP5-901	17.5	3.1	SIP5-902	20.0	4.2
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

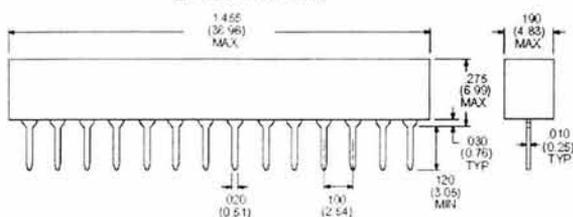
1. Rise Times are measured from 10% to 90% points
2. Delay Times measured at 50% points of leading edge
3. Output (100% Tap) terminated to ground through $R_T = Z_0$

Low-profile DIP/SMD versions refer to AIZ Series !!!
or DIL type TZB Series

10-Tap SIP5 Style Schematic



Dimensions in inches (mm)



Specifications subject to change without notice.

For other values & Custom Designs, contact factory.

SIP5 961

Rhombus Industries Inc.

15801 Chemical Lane, Huntington Beach, CA 92649-1595
Phone (714) 898-0980 • FAX (714) 896-0971
www.rhombus-ind.com • email: sales@rhombus-ind.com

A
CANBERRA

Model 3125 0-2/0-5 kV Dual H.V. Power Supply

Features

- Two independent high voltage power supplies
- Compact single width NIM
- Regulated 0 to +5000 V dc, 0 to 300 μ A output
- Voltage limit protection
- Polarity indication with preview
- Overload and short circuit protected
- Front panel meters
- Remote control capability

Description

The Canberra Model 3125 is a compact dual NIM high voltage power supply accommodating all types of detectors requiring up to 5 kV bias and up to 300 μ A of current. Its low noise and excellent stability make it well suited for high resolution detector systems.

The 3125 will withstand overload or direct output short-circuit for an indefinite period and provide normal output after the fault is removed. Each supply is continuously adjustable over the full range from 0 to +5000 V. With the application of an external input dc level or logic signal, the output voltage can be controlled over its full range or gated off, respectively. Front panel meters monitor the output voltage of each supply.

An internal jumper plug can be set limiting the maximum output voltage to +2000 V dc. For photomultiplier applications, this feature guards against inadvertent application of higher voltages which can result in permanent tube damage.

A polarity selector plug provides selection of positive or negative output polarity. To prevent inadvertent polarity reversal, the polarity selector plug is located inside the module. In addition, the polarity status is indicated by illumination of a front panel LED which can be previewed prior to activation of the power supply.

Specifications

INPUTS

INPUT POWER Powered from a standard NIM Bin and power supply.

PROGRAM (REMOTE) – Each supply independently accepts an external reference input to set output voltage when REMOTE/LOCAL switch is in REMOTE. 0 to -5 V input provides 0 to +5000 V dc output; max. input = 12 V; no output for positive voltages; $Z_i \geq 2$ M Ω ; rear panel L/RN connector.

INHIBIT – Each supply independently accepts an external inhibit signal to provide remote shutdown; logic low inhibits; max. logic low ≤ 0.7 V at 54 mA; open circuit or logic high ≥ 6 V resumes normal operation; open input pulled up to -12 V; max. input = 12 V; rear panel Winchester connector or BNC connector.

OUTPUTS

HV (Regulated High Voltage) Continuously adjustable, 0 to +5 kV, or 0 to +2 kV, (internally selected), 0 to 300 μ A output current capability, one rear panel SHV connector for each supply.



CONTROLS

ON/OFF – Front panel locking toggle switches to independently enable or disable each output.

OUTPUT VOLTAGE – Two front panel five-turn precision direct readout dials permit independent and continuous adjustment of each output voltage, +0 to 5000 V dc.

POLARITY – Internal selector plugs change the output polarity of each supply independently by reversing orientation.

REMOTE/LOCAL – Rear panel toggle switches to select LOCAL (manual) operation or REMOTE (external) reference input to determine output voltage for each supply.

2 kV LIMIT – Two internal jumper plugs for each power supply allow full 5 kV operation or limit each power supply output to ± 2 kV $\pm 10\%$.

INDICATORS

OUTPUT VOLTAGE – Independent output voltage meters for each supply.

POLARITY – Front panel LED indicators provide polarity status of each supply; operates when ON or OFF providing a polarity preview when the module is energized.

PERFORMANCE (Each Supply)

RIPPLE AND NOISE – ≤ 3 mV peak to peak at 100 μ A;
 ≤ 10 mV peak to peak at 300 μ A.

Phone contact information

Denmark: (45) 2 45 15 30 • Canada: (408) 665-5373 • Central Europe: +42 (62) 270 3700 • France: (33) 1 38 48 57 70 • Germany: (49) 6142 73400
Japan: (81) 3 5464 2851 • Russia: (7) 800 129 80 77 • United Kingdom: (44) 1225 819 533 • United States: (1) 202 238 2291
For other international specifications, prices, and use: (950) 5091 <http://www.canberra.com> or contact The Canberra U.S.A. Office.

17346x2 MSJ Printed in U.S.A.

OUTPUT STABILITY - Long term drift of output voltage is $\leq 0.01\%/hr$ and $\leq 0.02\%/2$ hr. at constant input line voltage, load, and ambient temperature, after a 30 minute warmup.

TEMPERATURE COEFFICIENT - $\leq \pm 50$ ppm/ $^{\circ}C$ after 30 minute warmup, operating range 0 to 50 $^{\circ}C$.

REGULATION - $\leq 0.002\%$ variation in output voltage over the load range and $\leq 0.001\%$ output variation for $\pm 0.1\%$ input voltage change within the operating range at constant ambient temperature.

OVERLOAD PROTECTION - Power supply will withstand any overload, including a short circuit for an indefinite period, and will resume normal operation upon removal of the fault.

CURRENT LIMIT - 600 μA maximum.

DIAL ACCURACY - $\pm 0.5\%$ of full scale.

CONNECTORS

OUTPUT VOLTAGE - Rear panel SMA for each supply.

PROGRAM - Rear panel Winchester M9S12N connector.

Winchester M9P1S mating plug provided.

INHIBIT - Rear panel BNC Connector for each supply.

POWER REQUIREMENTS

24 V - 160 mA ± 12 V - 60 mA

24 V - 160 mA 12 V - 60 mA

(Both supplies at maximum loads.)

PHYSICAL

SIZE - Standard single-width NIM module 3.43 x 22.12 cm

(1.35 x 8.71 in.) per DOE-ER-0157T.

NET WEIGHT - 1.9 kg (4.2 lb).

SHIPPING WEIGHT - 2.9 kg (6.4 lb).



➤ FUENTE DE ALTO VOLTAJE 3002D CANBERRA

A
CANBERRA

Model 3002D 0-3 kV H.V. Power Supply

Features

- Digital display of voltage and current
- Regulated 0 to ± 3000 V dc, 0 to 10 mA output
- External control of output voltage over full range
- Polarity indication with preview
- Noise and ripple ≤ 10 mV peak-to-peak
- Overload and short circuit protected

Description

The Canberra Model 3002D is a NIM Bin compatible high voltage power supply designed for operation with essentially all types of nuclear radiation detectors. Particularly well-suited for use with scintillation detectors, the standard double-width NIM module provides a well regulated output up to 10 mA at 0 to ± 3000 V dc.

A recessed switch on the bottom panel is used to select either 115 or 230 V ac input power furnished through a power line cord and connector. The Model 3002D can also be operated outside the NIM Bin from any ac power receptacle, since it requires no power from the Bin. The power supply will withstand any overload or direct output short-circuit for an indefinite period of time and provide normal output automatically upon removal of the fault.

Output voltage is continuously adjustable by means of the calibrated front panel control over the full range from 0 to ± 3000 V. The output voltage can also be controlled over its full range by application of an external input dc level of 0 to ± 5 V through a rear panel BNC connector. A $3\frac{1}{2}$ digit liquid crystal display meter measures output voltage with a resolution of 10 V, and output current with a resolution of 10 mA.

A polarity reversal switch provides selection of positive or negative output polarity. To prevent inadvertent polarity reversal, the switch is top panel mounted and screwdriver activated. In addition, the setting of the polarity selector switch is indicated by illumination of a front panel LED which can be previewed in the STANDBY mode.

Specifications

INPUTS

AC POWER LINE – 115/230 V ac $\pm 10\%$, 50-60 Hz, power supplied through rear panel 3-wire captive line cord with standard NEMA male connector; fully loaded input current 0.6 A, nominal

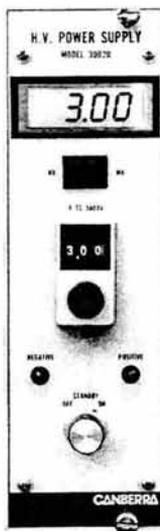
PROGRAM (BNC-32) – Accepts external reference input to determine output voltage when program switch is in REMOTE; 0 to ± 5 V input provides 0 to ± 3000 V dc output, no output for positive voltages; $Z_{in} = 2$ M Ω ; ± 12 V maximum, rear panel BNC connector. Remote programming is independent of selected output polarity.

OUTPUTS

HV (Regulated High Voltage Output) – 0 to ± 3000 V dc, continuously adjustable; 0 to 10 mA output current capability; two rear panel SHV high voltage coaxial connectors.

CONTROLS

POWER – Front panel 3-position switch (OFF-STANDBY-ON) for main ac power input.



METER SWITCH – Front panel rocker switch selects current or voltage display.

OUTPUT VOLTAGE – Front panel 3-turn (direct reading) locking potentiometer sets output voltage when rear panel program switch is in the local position; 0 to 3.00 kV.

LOCAL/REMOTE – Rear panel toggle switch selects LOCAL (manual) operation or REMOTE (external) reference input to determine output voltage.

POLARITY – Top panel 2-position screwdriver switch selects either POSITIVE or NEGATIVE output polarity.

115/230 V ac – Recessed slide switch on the bottom panel permits operation on either 115 or 230 V ac nominal input power.

INDICATORS

METER – $3\frac{1}{2}$ digit LCD meter indicates output voltage, 0-3.00 kV, or output current, 0 to 10.00 mA.

LEDs – Indicate selected polarity (positive or negative); operate in ON and STANDBY.

PERFORMANCE

RIPPLE AND NOISE – ≤ 10 mV peak-to-peak at full load.

Phone contact information

Benelux/Denmark (32) 7 491 35 30 • Canada (905) 465-5373 • Central Europe +43 (0)2235 27000 • France (33) 1 39 48 57 70 • Germany (49) 6192 72620
Japan 81-5-5544 2661 • Russia (7 095) 429-6577 • United Kingdom (44) 1235 876332 • United States (1) 203-236-2251

For other international representations, visit our Web Site: <http://www.canberra.com> or contact the Canberra U.S.A. office.

MODEL 3002D Panel 01.12.04

ORTEC®

142A, B, and C Preamplifiers

- Optimum performance for (A) low-, (B) medium-, and (C) high-capacitance charged-particle or heavy-ion detectors
- Extremely low noise
- Accepts 0 to ± 1 kV bias
- Separate fast-timing output signal with rise time from <5 ns
- Operates in vacuum
- Small size



The ORTEC Models 142A, 142B, and 142C Preamplifiers are low noise, fast-rise time, charge sensitive preamplifiers designed for optimum performance with charged particle or heavy-ion detectors.

The Model 142A is optimized for extremely low noise and fast timing for detectors with capacitance up to 100 pF. This makes it the ideal selection for high resolution alpha- and beta-particle spectroscopy applications.

Model 142B is optimized for extremely low noise and fast timing for detectors with capacitance greater than 100 pF but less than 400 pF.

Model 142C is optimized for extremely low noise and fast timing for detectors with capacitance greater than 400 pF.

These preamplifiers have a separate fast timing output with pulse widths of ~ 50 ns and rise times ranging from less than 5 ns for 0 pF detectors to less than 20 ns for 1000 pF detectors. This timing output, when used in conjunction with ORTEC's standard electronics, provides excellent time resolution (Fig. 1); also, its fast differentiated shape often permits direct coupling to the timing discriminator.

The performance of many spectroscopy systems can be enhanced by these preamplifiers being able to operate in vacuum enclosures. This allows the input cable length to be minimized. The small size of the preamplifiers is of significant importance when operating in such enclosures due to the limited space available.

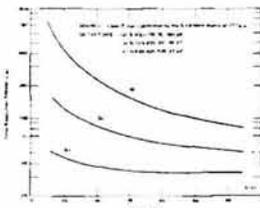


Fig. 1 Typical Time Resolution vs. Energy for Different Capacitance Detectors Using ORTEC Standard Electronics.

Specifications

PERFORMANCE*

NOISE (see Fig. 2)

Model	Detector Capacitance (pF)	Maximum Noise (nV/√Hz)
142A	0	1.50
142A	100	3.40
142B	100	3.20
142B	1,000	14.00
142C	400	7.50
142C	1,000	14.50
142C	2,000	27.00

INTEGRAL NONLINEARITY 50.0%, 0 to ± 1 V open output or ± 1.5 V terminated in 99 Ω

TEMPERATURE INSTABILITY

142A ± 250 ppm/°C from 0 to 40°C
142B ± 150 ppm/°C from 0 to 40°C
142C ± 150 ppm/°C from 0 to 40°C

OPEN LOOP GAIN

142A $\times 40,000$
142B $\times 80,000$
142C $\times 80,000$

CHARGE SENSITIVITY (Si equivalent)

142A Nominally 45 mV/MeV
142B Nominally 20 mV/MeV
142C Nominally 20 mV/MeV

ENERGY RANGE

142A 0–200 MeV
142B 0–400 MeV
142C 0–400 MeV

ECRP Maximum energy accepted without breakdown

142A 1.5×10^7 MeV/ps
142B 3×10^7 MeV/ps
142C 3×10^7 MeV/ps

RISE TIME (0 to 0.5 V pulse at E output on 99- Ω load)

142A < 5 ns at 0 pF, < 10 ns at 100 pF
142B < 5 ns at 100 pF, < 20 ns at 1,000 pF
142C < 11 ns at 400 pF, < 20 ns at 1,000 pF

DECAY TIME

142A Nominally 500 μ s
142B Nominally 1000 μ s
142C Nominally 1000 μ s

RECOMMENDED RANGE OF INPUT CAPACITANCE

142A 0 to 100 pF
142B 100 to 400 pF
142C 400 to 2000 pF

DETECTOR BIAS VOLTAGE ± 1000 V (Maximum)

*Typical values quoted unless specifically stated otherwise.

142A, B, and C Preamplifiers

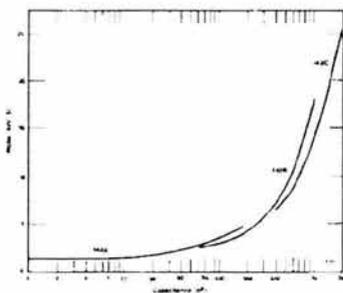


Fig. 2. Typical Noise as a Function of Input Capacitance Measured with an ORTEC Model 572 Amplifier and 2- μ s Time Constant.

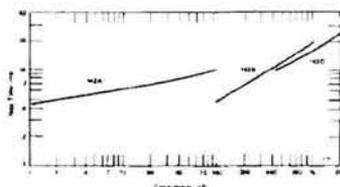
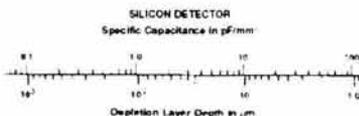


Fig. 3. Typical Rise Time as a Function of Input Capacitance with Rise Time Compensation Optimized at Each Data Point. (Values given are for a 0.5 V signal measured from the E channel.)



INPUTS

INPUT Accepts positive or negative charge input (normally from a semiconductor detector) to any type detector (BNC connector).

BIAS Accepts detector bias from 0 to 500 pF and applies this detector through the (INPUT) connector maximum 2100 V. Silicon detector (ORTEC type 0-38).

TEST Input for pulse generator to test and calibrate the system (BNC connector).

POWER Input power through 100 mA supply power source (ORTEC model amplifier or ORTEC Model 572-1 Pre-amplifier).

OUTPUTS

E Positive or negative linear full pulse for energy measurement (BNC connector).

T Negative or positive linear fast-ramped pulse for timing. This output is generated using an operating transistor that is designed to give the energy signal. To use this output, check with the dealer for BNC connector.

ELECTRICAL AND MECHANICAL

POWER REQUIRED

142A +24 V, 20 mA, -24 V, 10 mA,
+10 V, 25 mA, -12 V, 10 mA

142B +24 V, 40 mA, -24 V, 10 mA,
+10 V, 15 mA, -12 V, 10 mA

142C +24 V, 40 mA, -24 V, 10 mA,
+10 V, 15 mA, -12 V, 10 mA

WEIGHT

Net 0.42 kg (0.91 lb)

Shipping 1.25 kg (2.75 lb)

DIMENSIONS 168 mm (6.61 in.)
175 mm (6.89 in.)

SELECTION GUIDE TO 142A, 142B, OR 142C

To choose among Models 142A, 142B, or 142C:

1. Find the depletion depth of your detector. If it is an ORTEC detector, the last group (0.2 to 4.0 μ m) is the depletion depth.
2. Find the depletion depth on the graph above and read the capacitance in pF/mm on the top of the chart.

3. Multiply by the area of your detector in cm². This is the model 3-digit number for an ORTEC detector. Choose a Model 142A if the capacitance is less than 100 pF, a Model 142B if the capacitance is more than 100 pF but less than 400 pF, or a Model 142C if the capacitance is greater than 400 pF. Example: An ORTEC 0-214-NaI 35 detector will have about 1 pF/cm² for 100 μ m depletion depth. This area is 100 pF/cm² for the 200 mm² area, and a Model 142B Pre-amplifier is preferred.

Ordering Information

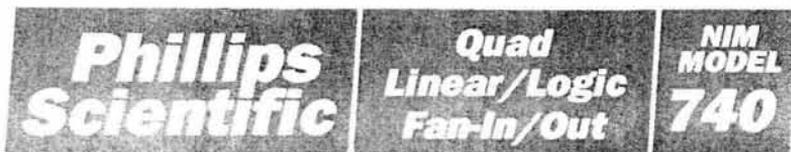
To order specify:

Model	Description
142A	Pre-amplifier (for 0 to 100 pF)
142B	Pre-amplifier (for 100 to 400 pF)
142C	Pre-amplifier (for 400 to 2000 pF)

Specifications subject to change
12/1/98

ORTEC® 800-251-9750 • www.ortec-online.com
info@ortec-online.com • Fax (865) 483-0396
801 South Illinois Ave., Oak Ridge, TN 37831-0855 U.S.A. • (865) 482-4411
For International Office Locations, Visit Our Website

AMETEK
ADVANCED
MEASUREMENT
TECHNOLOGY



FEATURES

- Four Independent Channels
- Linear or Logic Fan-In of Four and Fan-Out of Six per Channel
- Wideband - DC to 250 MHz
- Fully Bipolar Operation to ± 2.5 Volts
- DC Offset Control per Channel of ± 500 mVolts
- Reliable - Both Inputs and Outputs are Protected

DESCRIPTION

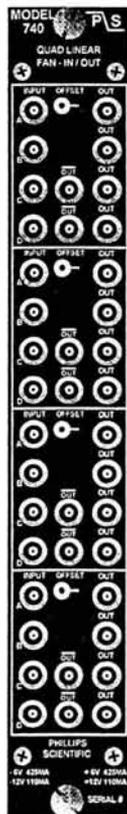
The Model 740 is a four channel, unity gain linear or logic Fan-In/Fan-Out packaged in a single width NIM module. Four linear inputs allow summing of linear levels or pulses. Both inverted and non-inverted output levels are produced simultaneously allowing very complex triggers to be fast and easy to develop. Direct coupling of all inputs and outputs eliminates the baseline shifts due to rate or duty cycle affects, while making the device useful for performing logic functions.

INPUT CHARACTERISTICS

- General** : Four LEMO connectors per channel, bipolar input; accepts positive or negative voltages.
- Impedance** : 50 ohms $\pm 2\%$ direct coupled input.
- Protection** : Protected with clamping diodes; no damage will occur from transients of ± 100 Volts (± 2 amps) for 1 μ Sec or less duration.
- Reflections** : Less than $\pm 4\%$ for input risetime of 1 nSec.
- Overdrive Response** : Recovery time of 20 nSec for a ± 10 Volt input.

OUTPUT CHARACTERISTICS

- General** : Six bridged LEMO output connectors per channel. Four non-inverted outputs and two inverted outputs; low impedance voltage source output stage.
- Protection** : Outputs can be continuously shorted to ground without suffering damage.
- Output Voltage Swing** : Bipolar outputs delivery over ± 2 Volts across four 50 ohm loads.
- DC Offset** : A front panel 15-turn potentiometer provides ± 500 mVolt adjustment. A front panel test point allows easy monitoring of the DC offset.



Phillips Scientific *A THEORY DEVELOPMENT COMPANY*
 31 Industrial Ave. * Mahwah, NJ 07430 * (201) 934-8015 * Fax (201) 934-8269

GENERAL PERFORMANCE

Gain	: Fixed gain of $1.0 \pm 2\%$ both inverted and non-inverted.
Stability	: Better than $\pm 50 \mu\text{Volt}/^\circ\text{C}$ from DC to 1 MHz, and $\pm 0.05\%/^\circ\text{C}$ above 1 MHz.
Linearity	: $\pm 0.2\%$ for ± 2 Volts across two 50 ohm loads or ± 1.5 Volts across four 50 ohm loads.
Bandwidth	: DC to 250 MHz, 3 db point 1 Volt peak to peak.
Wideband Noise	: Less than 400 $\mu\text{Volts RMS}$, referred to the input (25 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$).
Risetime	: Typically 1.3 nSec, for a 1 Volt output excursion.
Insertion Delay	: Typically 3.5 nSec.
Crosstalk	: Greater than 60 db, DC to 100 MHz.
Power Supply Requirements	: +6 V @ 425 mA +12 V @ 110 mA -6 V @ 425 mA -12 V @ 110 mA Note: All currents are within NIM specification limits allowing a full powered bin to be operated without overloading.
Operating Temperature	: 0°C to 70°C ambient.
Packaging	: Standard single width NIM module in accordance with TID-20893 and Section 524.
Quality Control	: Standard 36 hour cycled burn-in with switched power cycles.

1/96

Phillips Scientific

-A THEORY DEVELOPMENT COMPANY-
31 Industrial Ave. * Mahwah, NJ 07430 * (201) 934-8015 * Fax (201) 934-8269

ORTEC®

FTA420C Quad Fast Timing Amplifier
FTA820A Octal Fast Timing Amplifier

- For amplifying fast analog signals from photomultipliers, electron multipliers, photodiodes, micro-channel plates, and silicon charged-particle detectors
- <1 ns rise time
- Gain: FTA420C 20
FTA820A 200
- Output drives -5 V into 50 Ω
- Eight separate and identical amplifiers in a single-width NIM with FTA820A, four each for FTA420C
- <20 μV rms equivalent input noise

The FTA420C and FTA820A Amplifiers are high performance, wide-bandwidth amplifiers designed for boosting very fast linear signals from photomultipliers, electron multipliers, silicon charged-particle detectors, and other detectors used in fast timing applications. The rise time is <1 ns with a 5-V output, enabling excellent timing resolution.

The FTA820A provides eight separate and identical amplifiers in a single-width NIM module, while FTA420C provides four each. Each FTA820A amplifier section has a gain of 200 and the FTA420C's gain is 20; noninverting LEMO-type 00C50 connectors are used for all signal connections.

Specifications

PERFORMANCE

GAIN FOR EACH CHANNEL (10% gain tolerance) 200 for FTA820A and 20 for FTA420C, noninverting

NUMBER OF CHANNELS 8 and 4, respectively

RISE TIME <1 ns

NOISE <20 μV rms equivalent input noise

BANDWIDTH 30 to >350 MHz

PROPAGATION DELAY <30 ps variation between channels

OUTPUT RANGE 0 to -5 V with 50-Ω load

INPUTS One for each channel, LEMO connector, input impedance 50 Ω

OUTPUTS One for each channel, LEMO connector, 0 to -5 V output with a 50-Ω load, Output impedance <1 Ω

ELECTRICAL AND MECHANICAL

POWER REQUIRED +12 V, 350 mA
FTA820A, +12 V, 200 mA, FTA420C

DIMENSIONS Standard single-width NIM module 3.43 x 27.43 cm (1.35 x 8.714 in.) per DOE-ER 04571

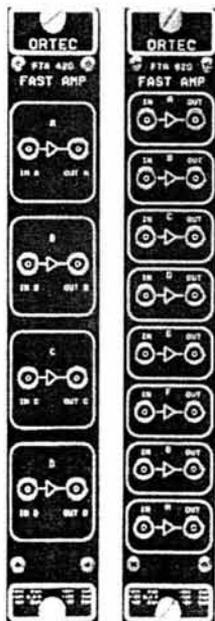
WEIGHT

Net 1 kg (2.2 lb)
Shipping 2.7 kg (5.9 lb)

Ordering information

To order, specify:

Model	Description
FTA420C	Quad Fast Timing Amplifier (20 gain, noninverting)
FTA820A	Octal Fast Timing Amplifier (200 gain, noninverting)



ORTEC®

CF8000

Octal Constant-Fraction Discriminator

- Good time resolution with a wide range of pulse amplitudes
- Internal delay — no cable necessary
- Automatic walk adjustment
- Multiplicity and OR logic outputs
- Analog sum output
- Inhibit input
- ECL outputs
- Energy outputs

The flexible ORTEC CF8000 Octal Constant Fraction Discriminator has the performance and convenience features necessary for ease of use in even the most demanding timing or coincidence experiments with multiple detectors. It contains eight constant fraction discriminators in a single-width NIM module. The constant fraction technique provides optimum time resolution over a wide range of pulse amplitudes.

Exclusive features of the CF8000 discriminator include internal shaping delay, automatic walk adjustment, an analog summation output, and built-in logic functions to minimize external logic requirements.

The input signals can range from 0 to 5 V. Each input has a separate threshold adjustment (with front panel monitor), which may range from 10 mV to 1 V.

For each channel there are three Fast-NIM logic outputs — one "A" and two "B" outputs. All outputs have adjustable widths. There is a single width adjustment for all eight "A" outputs, and another width adjustment for all 16 "B" outputs. There are also eight rear panel ECL outputs that have the same width as the "B" outputs. LEMO connectors are used for maximum packing density.

Each channel has a front panel "I" output that buffers the input signal.

External delay cables are not necessary on the CF8000 discriminator. Each channel has an internal shaping delay circuit that can be set for 2, 4, 6, 8, or 10 ns. Optional delay line plug-ins are available for changing the shaping delay ranges to 5, 30, or 50 ns. For all delay plug-ins, there are two possible delay settings. (See Accessories section.)

The automatic walk adjustment of the CF8000 instrument simplifies set-up and reduces the effects of ground loops on the incoming signal.

Other front-panel connections include: (1) an analog sum output (Σ), which provides an attenuated summation of all

inputs; (2) a multiply output (M), which provides a voltage proportional to the number of valid "B" outputs; (3) an OR logic output that provides a logic output for every active "B" output, and (4) an inhibit input (INH), which disables all "B" outputs.

The constant fraction ratio is factory set at 0.4.

Specifications

PERFORMANCE

WALK ± 200 ps from 50 mV to 5 V for a pulse rise time of 1 ns, a pulse width of 10 ns, a 20% delay, and the threshold set at minimum.

CONSTANT-FRACTION RATIO 0.4

INPUT/OUTPUT RATE 25 MHz maximum

PULSE PAIR RESOLUTION 450 ps

TRANSMISSION DELAY

"A" Outputs 12 ns, typical

"B" Outputs 16 ns, typical

THRESHOLD TEMPERATURE

SENSITIVITY < 100 pA (typical threshold 0.4 V)

CONTROLS

THRESHOLD CONTROL (TH) 20 turn rear-panel screwdriver adjustment for each discriminator channel. Minimum channel threshold is 10 mV.

THRESHOLD MONITOR 20 turn rear-panel screwdriver TH. Light-emitting diode indicator. Output signal threshold voltage.

WIDTH ADJUSTMENTS (IA and IB) 20 turn rear-panel screwdriver adjustment for all the widths of the "A" and "B" Fast-NIM logic outputs. Adjustment range: 100 ns to 20-250 ns.

DELAY 10 turn rear-panel screwdriver adjustment for the shaping delay to be selected. Four possible positions: 2, 4, 6, 8, or 10 ns. Delay always available in order.

INPUTS

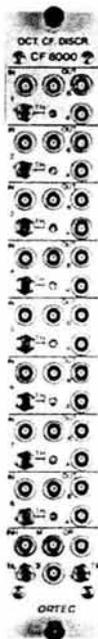
INPUTS Eight-panel LEMO connector for each channel.

INPUT RANGE 0 to 5 V

PROTECTED TO < 100 pA (typical), 0.5 μ A (max) I/O

IMPEDANCE 50 Ω (terminated)

INHIBIT INPUT Front-panel LEMO connector accepts negative Fast-NIM signal. Attenuated signal (factor of 10) signal to 50 Ω .



CF8000

Octal Constant-Fraction Discriminator

OUTPUTS

"A" LOGIC OUTPUTS (A) Eight channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

Amplitude: 4.0 V (nominal) maximum 4.2 V (at 100k Ω load) (max. cable speed for 4.2V is 100 ft)

"B" LOGIC OUTPUTS (B) Eight channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

Amplitude: 4.0 V (nominal) maximum 4.2 V (at 100k Ω load) (max. cable speed for 4.2V is 100 ft)

MULTIPLICITY OUTPUT (M) 4 channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

OR OUTPUT (OR) Eight channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

ANALOG SUM OUTPUT (S) 4 channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

ENERGY OUTPUTS (E) Eight channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

ECL OUTPUTS (O) Eight channels LEM's non-inverting pre-amplifier (50k Ω to 100k Ω) with a 100k Ω load resistor. Output 100ns rise/fall time setting.

ELECTRICAL AND MECHANICAL

POWER REQUIRED 100W (typical) 150W (maximum)

WEIGHT 100 lbs (typical) 150 lbs (maximum)

DIMENSIONS 100" x 100" x 100" (typical) 150" x 150" x 150" (maximum)

Optional Accessories

CFD-DELAY-5 ns Delay plug-in for 5 ns delay settings.

CFD-DELAY-10 ns (Factory installed in the instrument) Delay plug-in for 10 ns delay settings.

CFD-DELAY-30 ns Delay plug-in for 30 ns delay settings.

CFD-DELAY-50 ns Delay plug-in for 50 ns delay settings.

Ordering Information

To order the CFM module, specify:

Model	Description
CF8000	Octal Constant-Fraction Discriminator

To order delay options, specify:
CFD-DELAY-5 ns, CFD-DELAY-10 ns,
CFD-DELAY-30 ns, or CFD-DELAY-50 ns

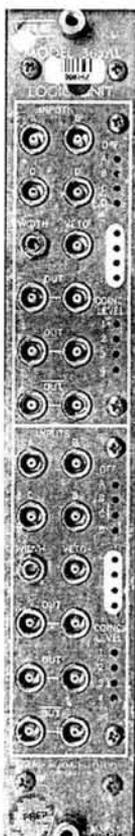
Order eight delay options to populate all 8 discriminator channels.

www.ortec-online.com • 800-251-9750

ORTEC

800-251-9750 • www.ortec-online.com
info@ortec-online.com • Fax (865) 483-0356
801 South Illinois Ave., Oak Ridge, TN 37831-0895 U.S.A. • (865) 482-4411
For International Office Locations, Visit Our Website

AMETEK
ADVANCED
MEASUREMENT
TECHNOLOGY



365AL DUAL 4-FOLD MAJORITY LOGIC UNIT

- NIM Packaging
- High Speed
- Multiple Input
- Multiple Output
- Selectable Number of Coincident Inputs

FOR HIGH SPEED LOGIC OPERATIONS

A logic unit generates a precise standard pulse when the inputs correspond to preset logical conditions. The inputs to the logic modules are standard NIM logic levels typically generated by a discriminator or another logic module. The inputs are restandardized and then compared to the setting of the module.

The logical conditions which can be selected are 4-fold, 3-fold (Model 365AL and Model 465), AND (all units) and an OR (Model 365AL and Model 622). If only one input is selected, then the units will act as a logic fan-out. The output of the logic module has a duration that is either the same period as the coincidence of the inputs (465) or is adjustable via a front-panel potentiometer for maximum flexibility. The output of a logic module is typically part of a trigger system which triggers, gates or disables a data acquisition system.

LeCroy's family of NIM logic modules are flexible and versatile. They offer a number of features and can be easily configured.

FEATURES

Multiple Channels - Each module has up to 3 channels and has 2 or 4 inputs per channel. A minimum of 5 outputs are available.

High Speed - All modules have greater than 110 MHz operation. In addition, all channels have adjustable output pulse widths.

Selectable Logic Function - Each unit has a switch selectable logic function from 4-fold coincidence (365AL and 465), to majority logic (365AL) to AND/OR (622).

High Performance - All three modules experience no multiple pulsing, have good output width stability and as low as 5 nsec double pulse resolution

FUNCTIONAL DESCRIPTION

LeCroy's NIM logic units offer flexibility, versatility, high speed and performance packaged in a single width NIM module. All together they provide the functions of majority logic, up to 4-fold coincidence, fan-in and fan-out and AND/OR Logic along with > 110 MHz operation. Each of the channels accept up to 2, Model 622, or 4, Model 365AL and Model 465, standard NIM logic signals.

Both the 365AL and the 465 have inputs which may be individually enabled or disabled without altering cabling or termination by means of front-panel switches. In the 465, with all inputs enabled, four inputs are required. Disabling the logic inputs is equivalent to reducing the number of simultaneous negative input signals required for an output. Thus, each channel may be programmed for 4-fold, 3-fold or 2-fold logic decisions. With only one input enabled, each channel operates as a logic fan-out.

The 365AL, however, has a selectable number of coincidence values to allow programming of one to four simultaneous input signals required for an output. Thus, it can operate similar to the 465 or can be used for the majority logic as well as a logic fan-in. Alternatively, the 622 features 4 channels with switch selectable AND or an OR output condition of the two inputs.

All three units offer at least 2 sets of bridged outputs and at least one complementary output as well as continuously adjustable output pulse duration. The output pulse width is set via a front-panel screwdriver control pot from 5 nsec to 600 nsec for the 622. The outputs are highly stable and independent of input amplitude, duration and rate. All units are updating and can be retriggered before the end of an output pulse. The 465 also has bridged overlap outputs (-32 mA) whose output pulse width is equal in duration to the coincidence overlap. Note that each unit can be used in a CAMAC crate with the Model 4501A NIM-to-CAMAC adapter.

SPECIFICATIONS

Model 365AL

INPUT

Logic Inputs: 4 Lemo-type connectors; 50 ohm impedance; negative NIM level input requirements; each input can be separately enabled or disabled.

Veto Input: Lemo-type connector; 50 ohm impedance; negative NIM level input requirements. Requires 3 nsec minimum width delayed 3 nsec from leading edge of input.

Bin Gate: Via rear connector; clamp to ground from +4 V inhibit; rise times and fall times < 50 nsec.

OUTPUT

Outputs: 3 pairs; 2 negative (quiescently 0 mA, -32 mA during output), one complementary (quiescently -32 mA, 0 mA during output).

Fan-out: 6-fold, if each output drives two 50 W loads. (Any used output pair should drive 25 ohm for proper amplitude and shape.)

Duration: Continuously adjustable from less than 4 nsec to greater than 50 nsec by means of front-panel screwdriver-adjustable potentiometer. Updating.

Output Rise and Fall Times: 1.2 nsec typical. Fall time is 2.2 nsec maximum at 10 nsec pulse width and longer.

GENERAL

Functions: AND; OR; Majority Logic; Leading Edge Inhibit; Complement; Pulse standardization without multiple pulsing; coincidence level determined by front-panel selector.

Coincidence Width: 1 nsec and up, determined by input pulse durations.

Rate: 150 MHz minimum.

Input-Output Delay: Approximately 10 nsec.

Double Pulse Resolution: Typical 5 nsec; (6.5 nsec for triple pulses).

Packaging: NIM single-width module; Lemo-type connectors used for all inputs and outputs.

Power Requirements: 55 mA at +12 V (increases to 120 mA if both channels in 4-fold coincidence), 165 mA at -12 V, 22 mA at -24 V.

ORTEC[®]

DB463
Delay Box



- Aligns fast-timing channels that incorporate coincidence circuits or TACs
- Four independent sections
- 50- Ω calibrated cable delay for linear or logic signals
- 0 to 63.5-ns delay in 0.5-ns steps

The ORTEC Model DB463 furnishes a 50- Ω calibrated cable delay, providing relative delays from 0 to 63.5 ns with 0.5 ns increments in each of four identical sections. Longer delays may be achieved by cascading several Model DB463 Delay Box sections.

The Model DB463 is convenient for aligning fast-timing channels that incorporate coincidence circuits or time-to-amplitude converters.

Specifications

INPUTS (4) 50- Ω impedance; 100 pA to 100 mA rms (50- Ω terminated)

OUTPUTS (4) 50- Ω impedance; max. output 100 mV rms (50- Ω terminated)

DELAY TIMES 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14, 14.5, 15, 15.5, 16, 16.5, 17, 17.5, 18, 18.5, 19, 19.5, 20, 20.5, 21, 21.5, 22, 22.5, 23, 23.5, 24, 24.5, 25, 25.5, 26, 26.5, 27, 27.5, 28, 28.5, 29, 29.5, 30, 30.5, 31, 31.5, 32, 32.5, 33, 33.5, 34, 34.5, 35, 35.5, 36, 36.5, 37, 37.5, 38, 38.5, 39, 39.5, 40, 40.5, 41, 41.5, 42, 42.5, 43, 43.5, 44, 44.5, 45, 45.5, 46, 46.5, 47, 47.5, 48, 48.5, 49, 49.5, 50, 50.5, 51, 51.5, 52, 52.5, 53, 53.5, 54, 54.5, 55, 55.5, 56, 56.5, 57, 57.5, 58, 58.5, 59, 59.5, 60, 60.5, 61, 61.5, 62, 62.5, 63, 63.5 ns

DELAY ACCURACY ± 0.5 ns (typical) over the full range of delay times

REFLECTIONS ≤ -20 dB (typical) over the full range of delay times

CABLE RG-178 (50- Ω)

WEIGHT 40 g (1.4 oz)

Shipping 40 g (1.4 oz)

DIMENSIONS 49 mm (1.93 in) wide for delay box mounting; 49 mm (1.93 in) high; 49 mm (1.93 in) deep

Ordering Information

For order details

Model Description

DB462 1-section

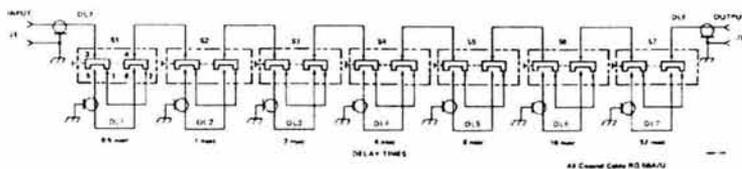


Fig. 1 Typical Schematic for One Section of Model DB462 (Four Sections Included)

ORTEC[®]

567

Time-to-Amplitude Converter/SCA

- For time spectroscopy in the range from 10 ns to 2 ms
- Includes SCA to set a time window for coincidence experiments
- Valid Start and Valid Conversion outputs
- Selectable output delay and width
- Output synchronized with a stop or external strobe signal
- Provision to reject unwanted start or stop input signals
- Positive or negative input signals



The ORTEC Model 567 Time-to-Amplitude Converter Single Channel Analyzer (TAC/SCA) measures the time interval between start and stop input pulses, generates an analog output pulse proportional to the measured time, and provides built-in single channel analysis of the analog signal. Additional gating modules are not necessary with this unit and timing experiments requiring time ranges of 10 ns to 2 ms may be performed with single channel analysis, giving the experimenter unparalleled flexibility in analyzing and measuring events that occur within a selected time range.

Separate gating and coincidence circuitry detection of the start and stop inputs eliminates unwanted events from the time scale for the externally imposed energy or timing resolutions. The Model 567 also incorporates a built-in SCA inhibit feature in which a TAC output is available only if the output pulse falls within the window restrictors imposed by the SCA. This feature may be switched in or out by a convenient front panel switch.

In addition to its start and stop input gating capabilities, the Model 567 provides for a pulse or clock level detector input via a front panel input connector. A level inhibit input signal terminates the conversion cycle and maintains a reset condition inhibiting further TAC conversions for the duration of the level inhibit pulse. A TAC output pulse that is in process of the time a level inhibit input is received will be completed before conversion reset is initiated.

Valid Start and Valid Conversion outputs are provided for the accepted start and stop input respectively. The function of the Valid Start output indicates the interval to an accepted start until the end of reset. Valid Conversion occurs from the end of the internal delay after stop to the end of reset.

The selectable TAC output width and variable delay, which can easily be adjusted, further serve to make the Model 567 a flexible instrument. The output of the TAC may be synchronized with the stop signal or an external strobe signal to further enhance its versatility. The single channel analyzer section of the Model 567 allows the experimenter to

place very specific time restrictions on the timing spectrum. The SCA is operated in the Window mode, where the upper level discriminator setting is adjusted to that of the lower level discriminator. The SCA output pulse width is equal to the time from the occurrence of the TAC output until the end of the reset pulse or the end of the TAC output. The synchronization of the SCA output with the stop input virtually eliminates any time walk in the SCA output.

All Model 567 inputs are printed wiring board (PWB) jumper selectable to accept either negative or positive NIM standard signals. All inputs and outputs are decoupled so that changing input conditions will not hinder normal operation of the Model 567. The TAC output should be connected to the decoupled output of a multi-channel analyzer (MCA) for optimum high count rate performance.

Specifications

- PERFORMANCE**
Time-to-Amplitude Converter
- TIME RESOLUTION:** 10 ns to 2 ms
 (range 10 ns to 2 ms)
- TEMPERATURE INSTABILITY:** ±0.01%
 (typical) ±0.02% (maximum) (100°C)
- DIFFERENTIAL NONLINEARITY:** Typically
 ±0.01% from 10 ns to 2 ms (single channel operation)
 (range 10 ns to 2 ms)
- INTEGRAL NONLINEARITY:** ±0.01%
 (range 10 ns to 2 ms)
- RESET CYCLE:** 10 ns to 2 ms (range 10 ns to 2 ms)
 (range 10 ns to 2 ms)
- START-TO-STOP CONVERSION TIME:** 10 ns to 2 ms
 (range 10 ns to 2 ms)
- Single-Channel Analyzer**
- THRESHOLD INSTABILITY:** ±0.01%
 (typical) ±0.02% (maximum) (100°C)
- THRESHOLD NONLINEARITY:** ±0.01% (range 10 ns to 2 ms)
- CONTROLS (Front Panel)**
- RANGE (ms):** Three-position rotary switch allows the user to select 10 ns, 100 ns, or 1 ms (range 10 ns to 2 ms)

MULTIPLIER Five-position rotary switch (selects) multiplied by a multiplying factor of 10, 100, 1000, or 10,000.

DELAY 10-turn screw-driven adjustable potentiometer varies the delay of the TAC and SCA outputs from 0.5 to 10.0 μ s, relative to an accepted Stop input signal (available in the Ext Strobe mode only).

STROBE MODE Two-position locking toggle switch selects either Internal or External source for initiating the strobe cycle. Strobe valid time depends on the TAC and SCA outputs.

START GATE MODE Two-position locking toggle switch selects either Coincidence or Anti-Coincidence mode of operation for the Start input. Coincidence is available in the Count position and Anti-Coincidence is available in the Stop position of the Start (Gate) input signal.

STOP GATE MODE Two-position locking toggle switch selects Coincidence or Anti-Coincidence mode of operation for the Stop input. Anti-Coincidence is available in the Count position and Coincidence is available in the Stop position of the Stop (Gate) input signal.

SCA WINDOW (G) 10-turn screw-driven potentiometer sets the SCA lower level discriminator threshold from 0.2 to 10.0 pA. It stores the lower level (L) setting.

SCA LOWER LEVEL (T) 10-turn screw-driven potentiometer sets the SCA lower level discriminator threshold from 0.2 to 10.0 pA. It stores the lower level (L) setting.

TAC INHIBIT Two-position locking toggle switch in the input position of the TAC output is available only if the output window is within the SCA window in the Out position of the SCA discriminator on the TAC output.

CONTROLS (Rear Panel)

EXT STROBE RESET Two-position locking toggle switch allows the converter to be reset (normally 10 μ s or 100 μ s after an accepted Stop input signal) in Ext Strobe mode if the signal has not been received.

INPUTS

Start Input (panel input) - Input signal (at selected edge triggered) available when panel PWR jumper is available to accept either negative or positive NIM standard binary input threshold of 0.0 Q in the negative position and 0.0 Q in the positive

position. The threshold is nominally ± 400 mV in the negative position and ± 5 V in the positive position.

STROBE Provides an external means to strobe a valid output signal from the TAC in the Ext Strobe mode. The input signal, exceeding threshold within the Ext Strobe Reset interval after the Stop input, initiates the next cycle of the linear gate to the TAC output. Factory set in the positive input position. Ext Strobe Reset threshold has a minimum value of ± 0.5 μ s and a maximum value of nominally 10 μ s to 100 μ s (switch selectable on rear panel).

START Time conversion initiated when Start input signal exceeds threshold. Factory set in the negative input position.

STOP Time conversion terminated when Stop input signal exceeds threshold. Factory set in the negative input position.

RESET/INHIBIT Terminates conversion cycle and maintains reset condition, inhibiting further TAC conversions. For the duration of the reset cycle in the Reset/INHIBIT pulse, whenever it is under A TAC output pulse in process at the time of a Reset/INHIBIT signal will be completed before conversion reset is initiated. Factory set in the positive input position.

START GATE Provides an external means of gating the Start input in either Coincidence or Anti-Coincidence with the Start input signal. Start Gate input signal must cross threshold (0.0 mV level) to the Start input signal and overlap the trigger edge of the signal. Factory set in the positive input position.

STOP GATE Provides an external means of gating the Stop input in either Coincidence or Anti-Coincidence with the Stop input signal. Stop Gate input signal must cross threshold (0.0 mV level) to the Stop input signal and overlap the trigger edge of the signal. Factory set in the positive input position.

OUTPUTS

TAC Front and rear panel BNC connectors provide standard double-ended

output (0 to +10 V and 0 to -10 V).

Start/Stop Input terminals

Time End of delay period in Ext Strobe mode

Amplitude Strobe input in Ext Strobe mode

Width Adjustable by PWR potentiometer from 1 μ s to 9 μ s.

Impedance Front panel Z₀ ± 10 Ω (see page 60 Q)

Rise Time ± 250 ns

Fall Time ± 250 ns

VALID START Rear panel BNC connector provides NIM standard slow positive logic level signal.

Amplitude Nominally ± 5 V. Complement signal selectable by PWR jumper.

Time and Width From accepted Start input and delay.

Impedance Z₀ ± 10 Ω

Rise Time ± 50 ns

Fall Time ± 50 ns

VALID CONV Rear panel BNC connector provides NIM standard slow positive logic level signal for use as a Valid Conversion.

Amplitude Nominally ± 5 V. Complement signal selectable by PWR jumper.

Time and Width From end of external delay after Stop to end of reset.

Impedance Z₀ ± 10 Ω

Rise Time ± 50 ns

Fall Time ± 50 ns

SCA Front and rear panel connectors provide NIM standard slow positive logic level signals.

Amplitude Nominally ± 5 V. Complement signal selectable by PWR jumper.

Time and Width From Start of TAC linear output to either end of reset or end of linear output. PWR selectable. Factory set at end of reset.

Impedance Z₀ ± 10 Ω

Rise Time ± 50 ns

Fall Time ± 50 ns

ELECTRICAL AND MECHANICAL

POWER REQUIRED ± 24 V, 85 mA, ± 12 V, 210 mA, ± 24 V, 165 mA, ± 12 V, 930 mA.

WEIGHT

Net 1.4 kg (3.0 lb)

Shipping 3.2 kg (7.0 lb)

DIMENSIONS 178 mm standard double width module 6.40 X 20.5 cm (2.50 X 8.14 in.) (see DOC# R-46577)

For order inquiry

Model Description

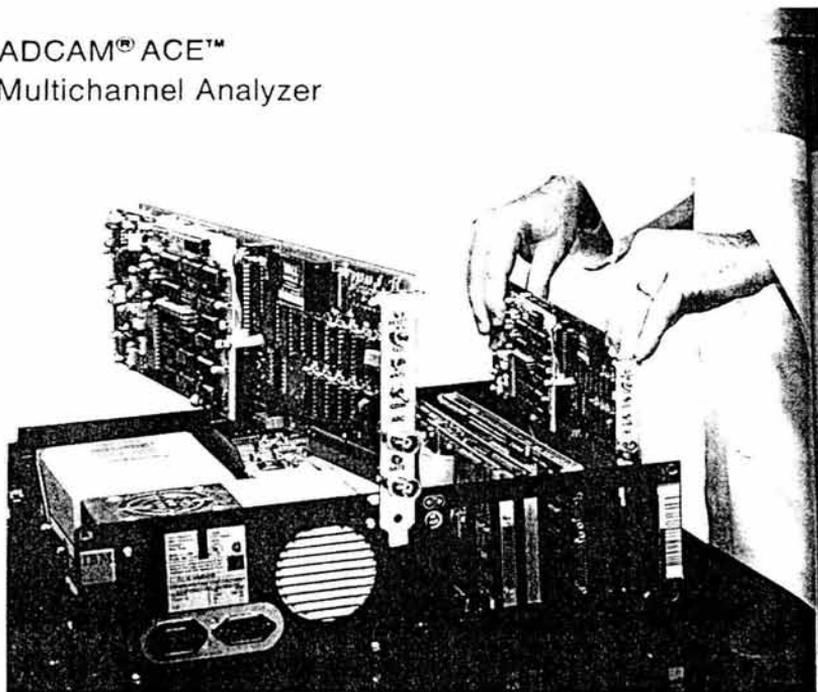
567 Time-to-Amplitude Converter/SCA

Specifications subject to change
(1/1992)

ORTEC 800-251-9750 • www.ortec-online.com
info@ortec-online.com • Fax (865) 483-0396
801 South Illinois Ave., Oak Ridge, TN 37831-0895 U.S.A. • (865) 482-4411
For International Office Locations, Visit Our Website

AMETEK
ADVANCED
MEASUREMENT
TECHNOLOGY

ADCAM[®] ACE™ Multichannel Analyzer



The ADCAM ACE Multichannel Analyzer (MCA) is a 1U slot card and a software package that allows the user to convert an existing IBM[®] PC (PCXT, PCAT, or PC compatible) personal computer into a convenient, low-cost MCA that is both friendly and flexible. The ACE package consists of a 916 ADCAM[®] Multichannel Buffer (MCB) and an MCA Emulation software package.

The ACE MCA is available in both 2k- and 4k-channel versions. Up to four ACEs may be controlled from a single PC. An expandable chassis is available if extra slot space is needed.

MCA EMULATION FEATURES OF THE ACE MCA

- Live spectral display (color optional)
- Displays one spectrum while acquiring another
- Supports one to four MCBs
- Graphic printout of results (with necessary hardware)

STANDARD ANALYSIS FEATURES

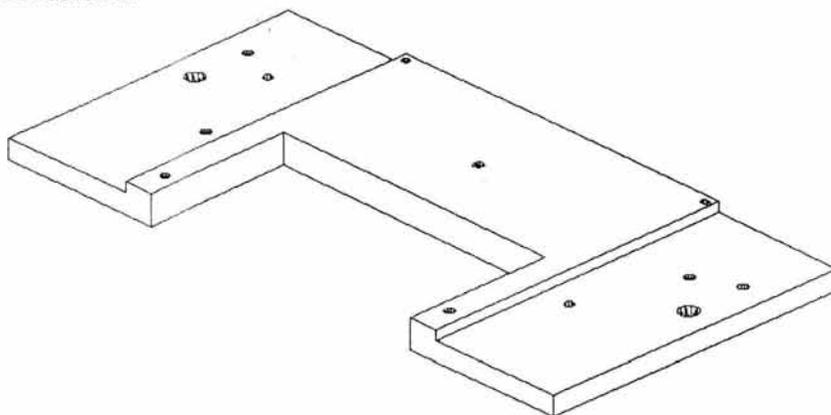
- 257 regions-of-interest (ROIs), storable on disk
- Gross/net areas with errors
- Two-point energy calibrate
- Peak find within an ROI (used by calibrate)
- Peak centroid
- Full width (1/2, 1/10, 1/X) maximum
- Fractional spectrum stripping referenced to spectrum on disk
- Compares current spectrum with reference spectrum from disk
- Integral, total counts in spectrum
- Smooth (5 point)

APÉNDICE 2 PLANOS DEL DETECTOR

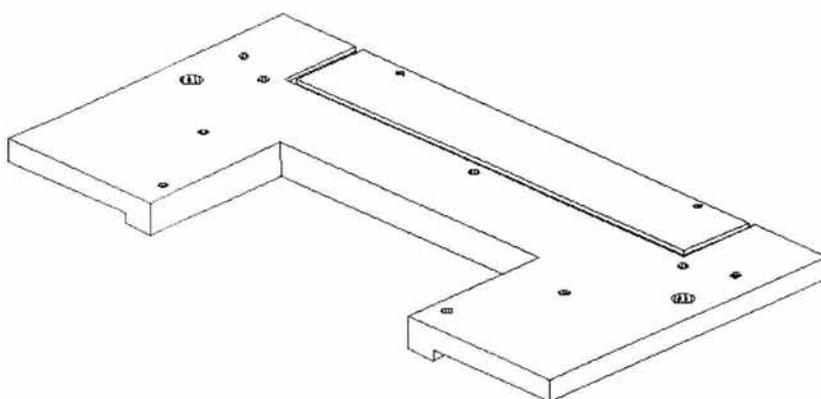
➤ CABECERAS.

Dos piezas simétricas de aluminio T5 de $\frac{1}{2}$ ". Forman parte del marco sobre el cual irá montado el ánodo.

VISTA SUPERIOR



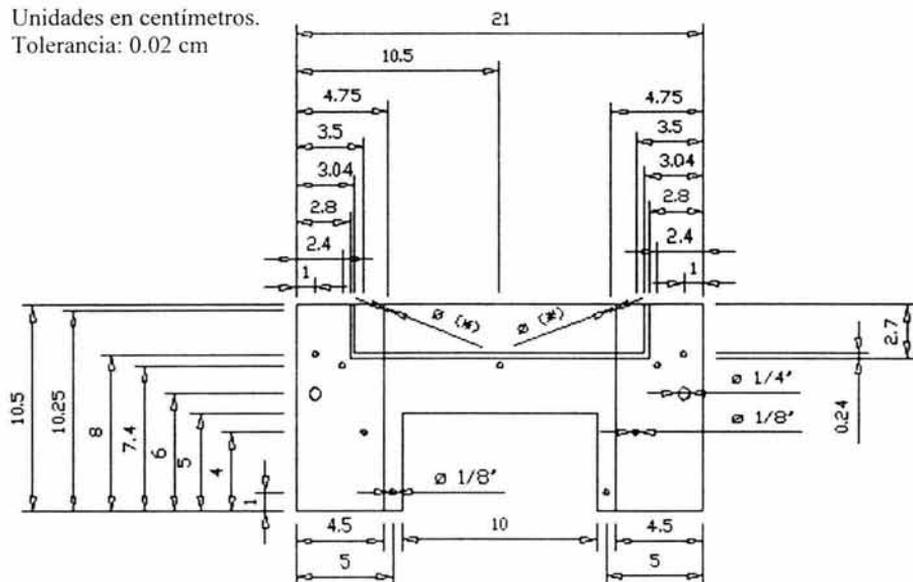
VISTA INFERIOR



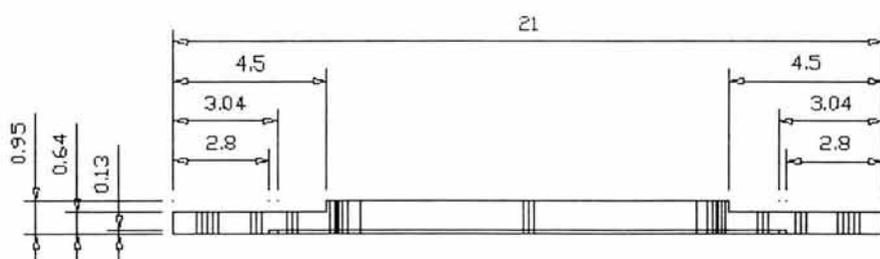
VISTA DE PLANTA INFERIOR

Unidades en centímetros.

Tolerancia: 0.02 cm



VISTA DE PLANTA LATERAL

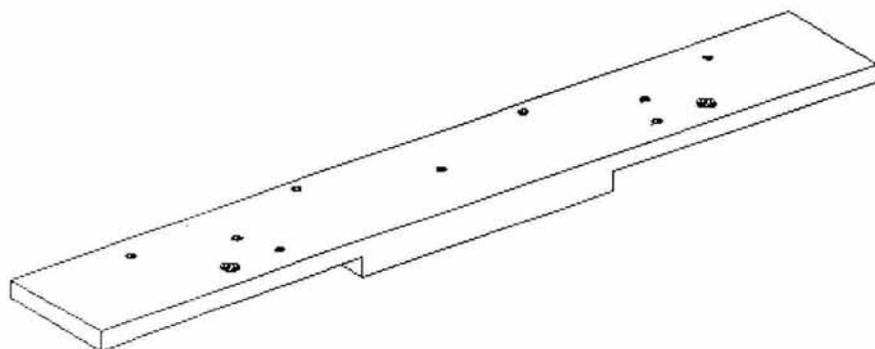


Los hoyos con la notación $\rightarrow \theta (*)$, tienen un diámetro de $3/32''$ y cuerda estándar.

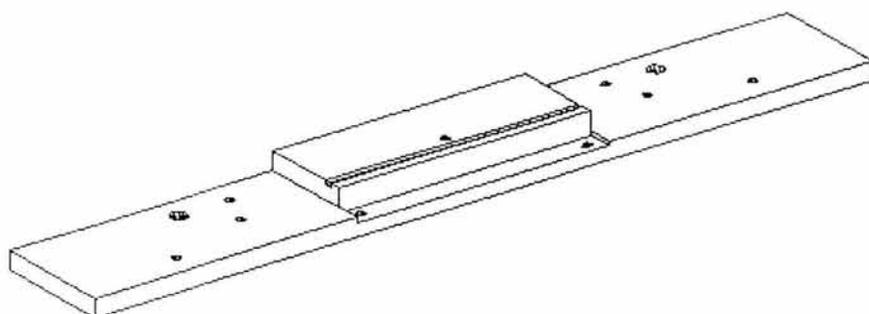
➤ *LATERALES.*

Dos piezas simétricas de aluminio T5 de 1/2". Forman parte del marco sobre el cual irá montado el ánodo.

VISTA SUPERIOR



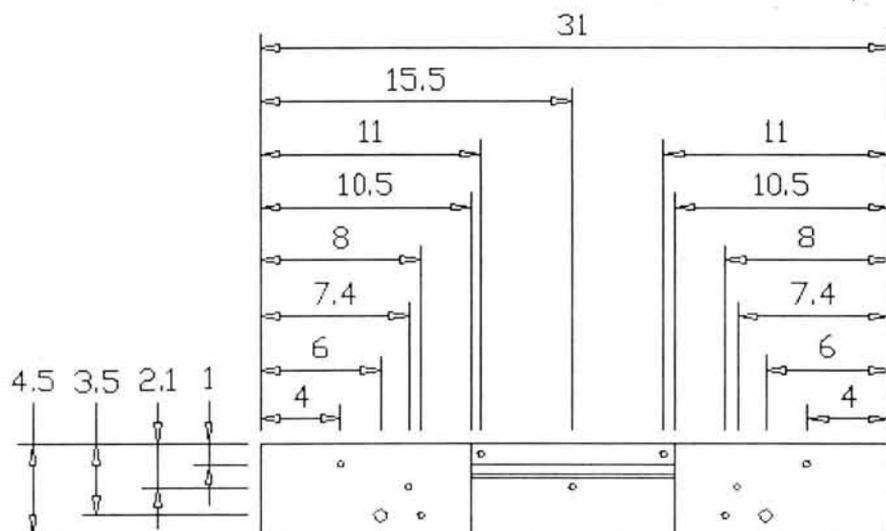
VISTA INFERIOR



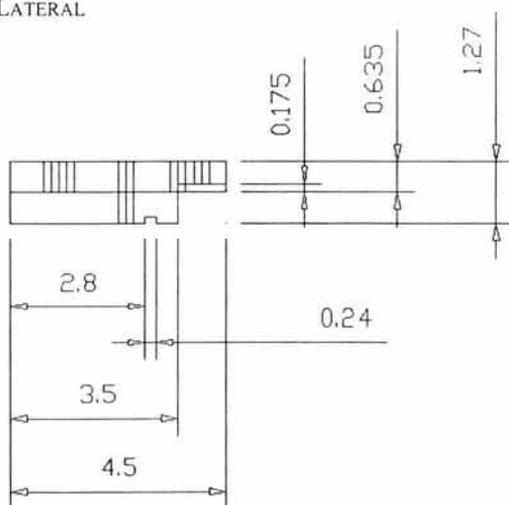
VISTA DE PLANTA INFERIOR

Unidades en centímetros.

Tolerancia: 0.02 cm



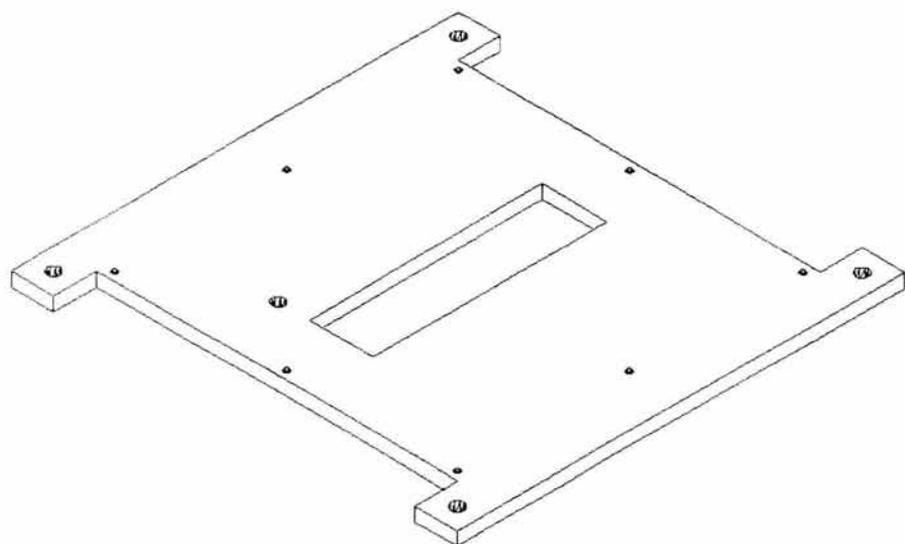
VISTA DE PLANTA LATERAL



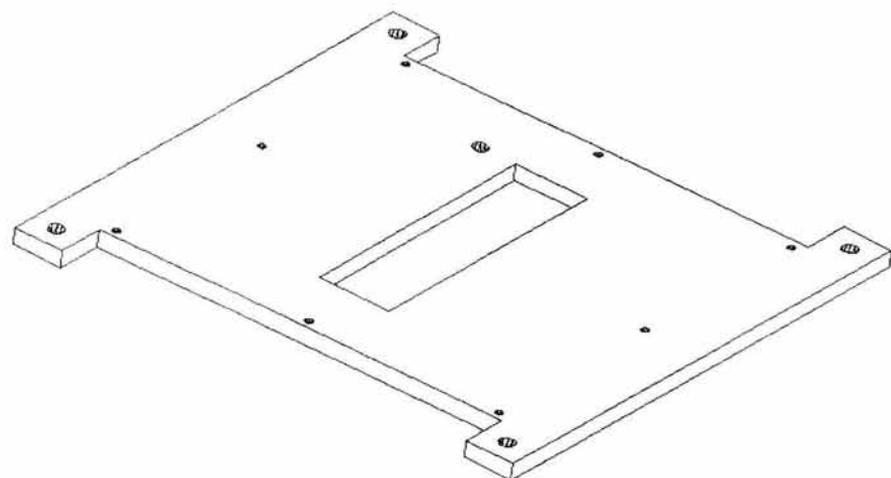
➤ *TAPA SUPERIOR*

Una pieza de aluminio T5 de $\frac{1}{4}$ ".

VISTA SUPERIOR

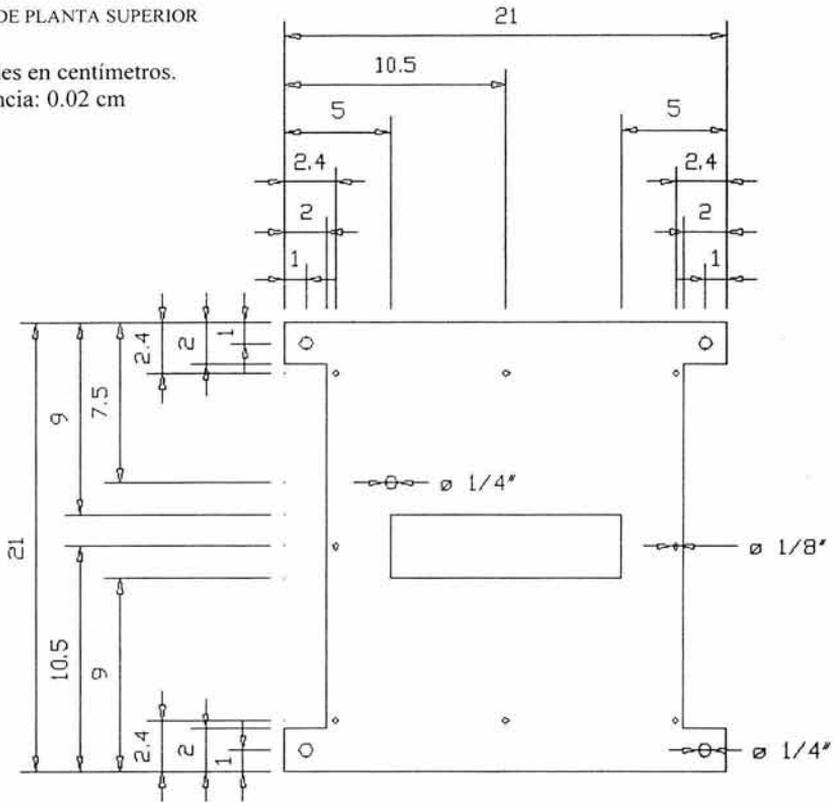


VISTA INFERIOR

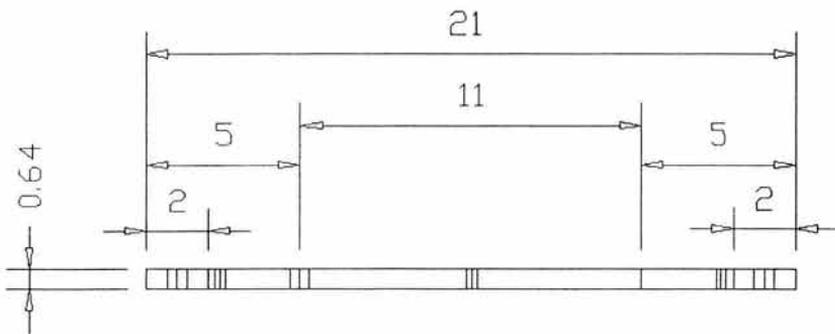


VISTA DE PLANTA SUPERIOR

Unidades en centímetros.
Tolerancia: 0.02 cm



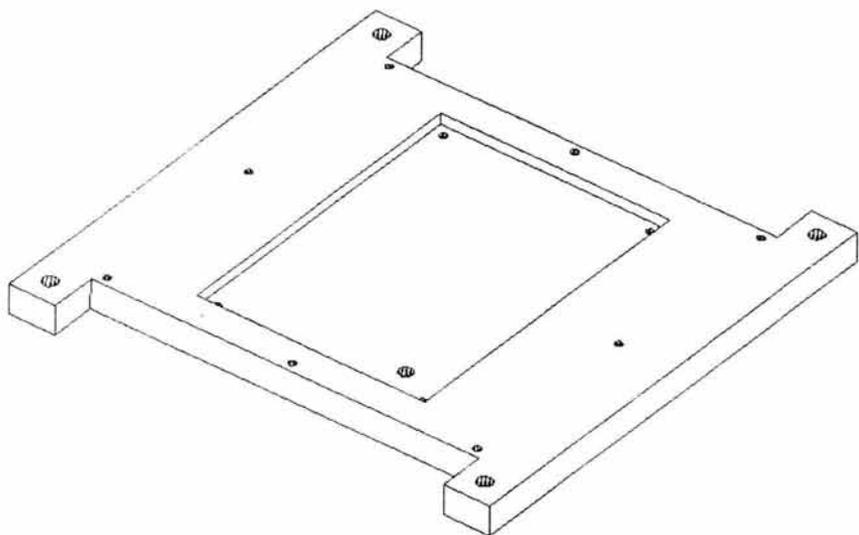
VISTA DE PLANTA LATERAL



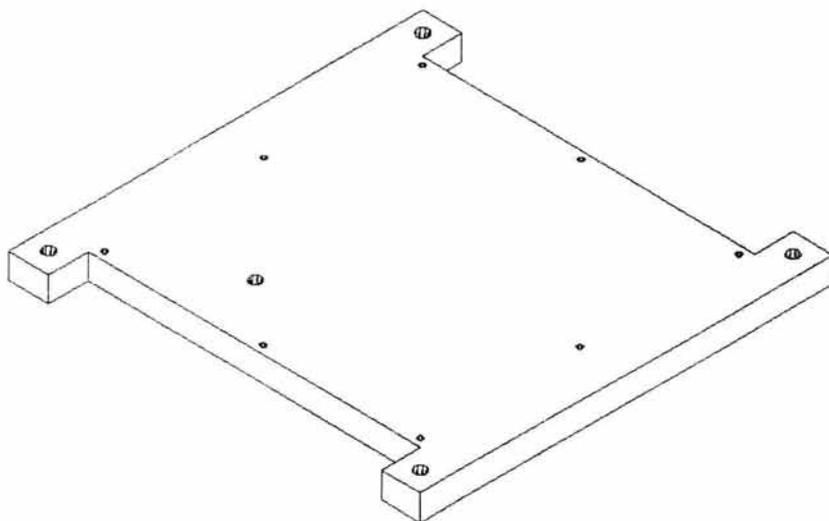
➤ TAPA INFERIOR

Una pieza de aluminio T5 de ½".

VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR

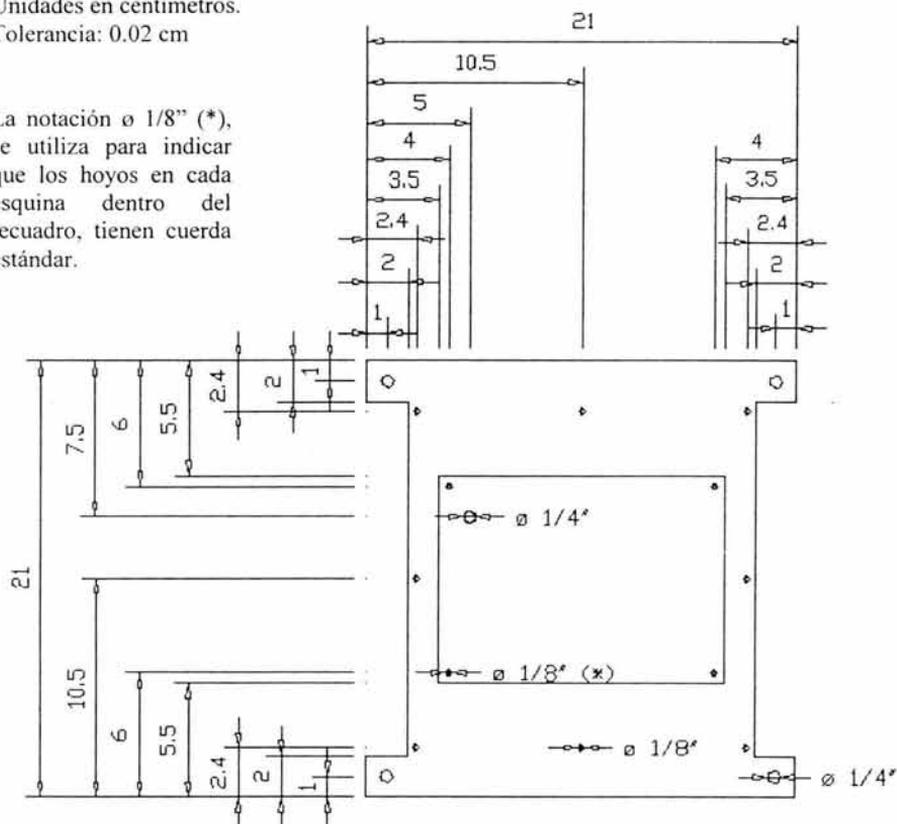


VISTA DE PLANTA SUPERIOR

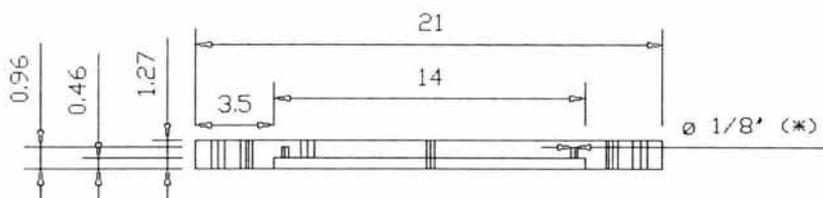
Unidades en centímetros.

Tolerancia: 0.02 cm

La notación $\varnothing 1/8''$ (*), se utiliza para indicar que los hoyos en cada esquina dentro del recuadro, tienen cuerda estándar.



VISTA DE PLANTA LATERAL



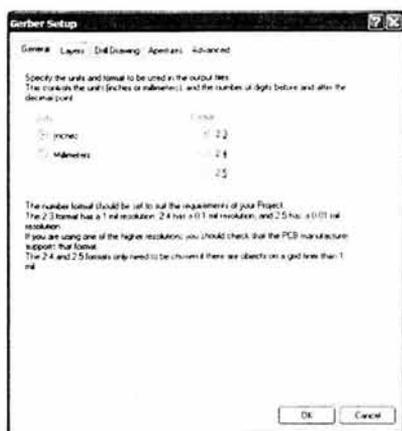
APÉNDICE 3

Obtención del Gerber en Protel DXP

Los archivos que generaremos se guardarán en la misma ubicación de nuestro archivo PCB, por lo que es conveniente que tengamos nuestro archivo PCB en una carpeta en la cual éste archivo sea el único.

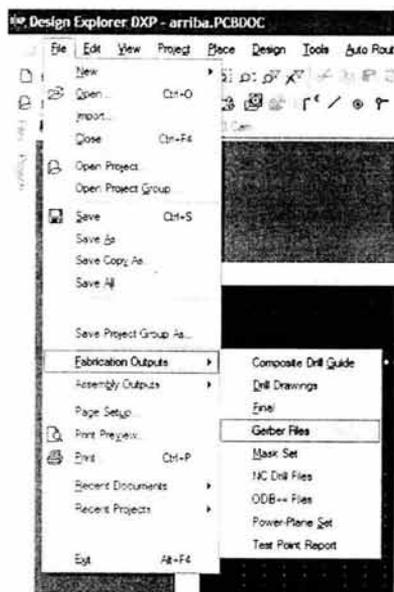
Una vez abierto nuestro archivo en Protel DXP, en el menú FILE, seleccionar Fabrication Outputs, Gerber Files.

Se abre la carpeta del gerber y en la primer pestaña (General), se asigna el sistema de unidades a usar. También se pide la tolerancia de error para el circuito.



En la pestaña Layer se habilitan las partes del circuito de las que se quiere obtener el gerber. Para un circuito de una sola cara, se debe haber trazado todo en Bottom Layer. Entonces, si este es el caso, se seleccionan las capas (layers) correspondientes.

Nota 1: Todos los circuitos deben incluir el Keep Out Layer, y en este paso, también se debe habilitar.



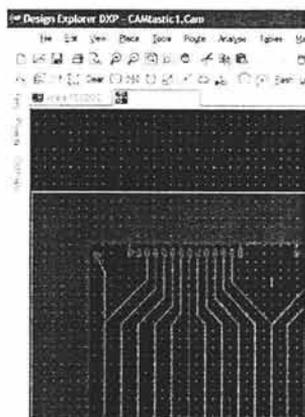
Tanto las pestañas de Drill Drawings y Aperturas deben quedarse con la configuración predeterminada.



En la pestaña Advanced, se modifica solamente la opción Leading/Trailing Zeros y se selecciona la opción Keep.

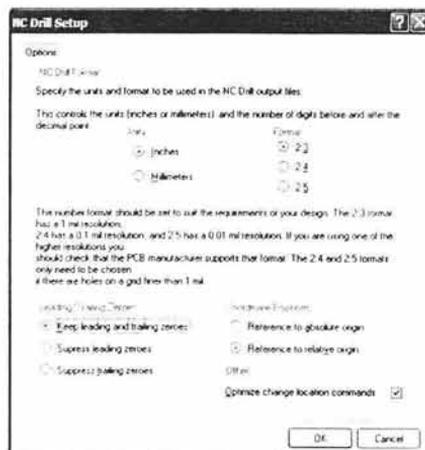


Protel abre una nueva ventana (CAM) en la que aparece el circuito, pero sin las marcas de los hoyos.



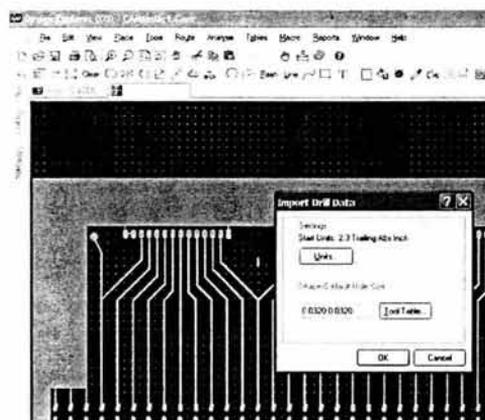
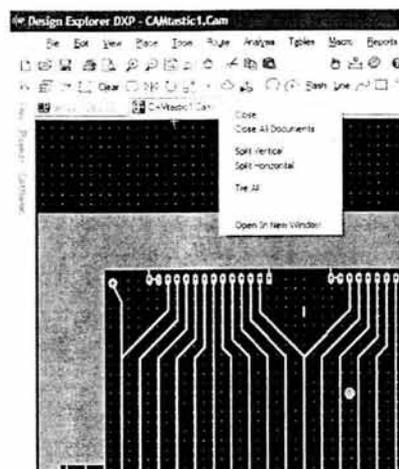
Regresar a la ventana PCB y nuevamente en el menú FILE, seleccionar la opción FABRICATION OUTPUTS y ahora se selecciona NC Drill.

Se abre una carpeta en la que se realizan las mismas asignaciones que se hicieron en el gerber. La carpeta debe quedar así:



Protel nos regresa a la ventana CAM, el circuito ha cambiado de color y en la ventana que aparece preguntando por las asignaciones, dar OK.

Ahora tenemos en la ventana CAM nuestro circuito con los hoyos en sus posiciones correspondientes. Para terminar el procedimiento, cerramos nuestra ventana CAM.



Esto se hace dando un clic derecho sobre la pestaña de la ventana CAM, y seleccionar close. Nos pide guardar los cambios, en este paso se asigna el nombre y ubicación del archivo. Conviene guardarlo en la misma dirección en donde se encuentra nuestro archivo PCB.

Eso es todo.

Con el explorador de windows, podemos observar que en la carpeta en la que tenemos nuestro archivo PCB, ahora aparecen los archivos que acabamos de generar. Estos archivos son los que utilizaremos en el CIRCUIT CAM.

Gerber desde PROTEL 99SE

1. Abrir el circuito PCB
2. MENÚ **File** → **CAM_MANAGER**
3. Al abrirse el **Output Wizard**, seleccionar **Gerber**.

Si se quiere, en este paso: Asignar nombre, unidades, tolerancias, características del circuito y por último guías y dibujos de los hoyos.

4. Una vez que se generó el Gerber, desde la ventana de **CAM OUTPUTS**, en el menú **Tools** → **Cam Wizard**.

Ahora se selecciona **NC Drill**, en este paso, se hace lo mismo que lo hecho en el Gerber.

5. En la ventana **CAM OUTPUT**:

Dar clic derecho sobre el archivo Gerber y seleccionar la opción **GENERATE CAM FILES** o bien, presionar la tecla **F9**.

Repetir para el archivo **NC Drill**.

También se pueden generar los archivos gerber y **NC Drill** al mismo tiempo, cuando se habilitan sus casillas correspondientes y luego se presiona la tecla **F9**.

Los archivos generados aparecen en la ventana **CAM FOR NOMBRE DEL ARCHIVO** a su vez, los archivos han sido exportados a la carpeta *Temporal* de *Windows*. Aparece en la carpeta *Temporal*, una nueva carpeta con el nombre **CAM FOR NOMBRE DEL ARCHIVO PCB**.

Estos archivos se usarán en el programa **CIRCUIT CAM 4**.

Nota 2: Con la versión de Protel 99SE, las coordenadas de los hoyos no coinciden con las coordenadas en el circuito impreso, por lo que hay que unificarlas. Esto se hace con el icono **matching** del menú de herramientas.

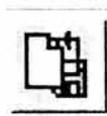
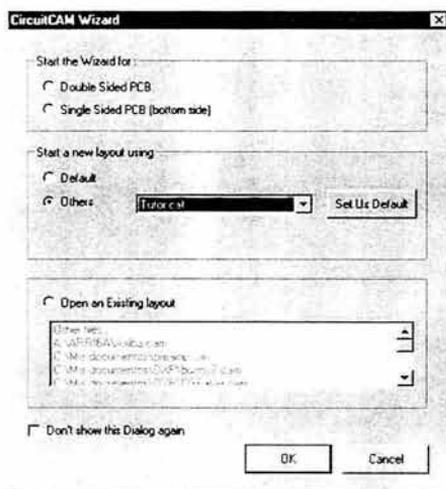
Hay que seleccionar un hoyo y su correspondiente localización en el circuito impreso, una vez hecho esto, se puede continuar con el procedimiento.

CIRCUIT CAM 4.0

Al abrir el programa, de forma predeterminada, se pregunta la forma en que se desea iniciar. Seleccionar la opción **Others** y habilitar **Tutor.cat** y **OK**.

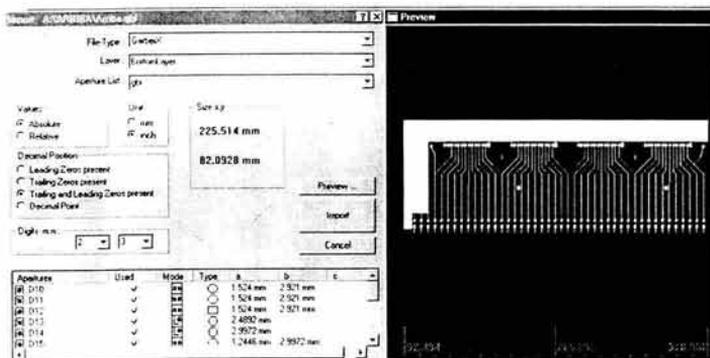
Existen dos opciones para trabajar el programa: modo gráfico y asistente (wizard). Al seleccionar la opción **Tutor.cat** se abre el programa en el modo gráfico.

El siguiente paso es importar nuestros archivos gerber y NC Drill ya generados en algún software para diseño de circuitos impresos.



Para importar archivos, utilizamos el icono **Import**. Al dar clic en él, nos pide la ubicación y nombre del archivo a importar. Se pueden importar varios archivos a la vez o de uno en uno. Para importar varios archivos a la vez, se mantiene presionada la tecla CTRL mientras se seleccionan los archivos.

De acuerdo al tipo de archivo que se importe, se deberá asignar la capa (layer) adecuada, así como la lista de apertura correspondiente en la ventana que aparece tras activar la función **Import**. Para ver qué es lo que se está importando, **Preview** da una vista previa del archivo.

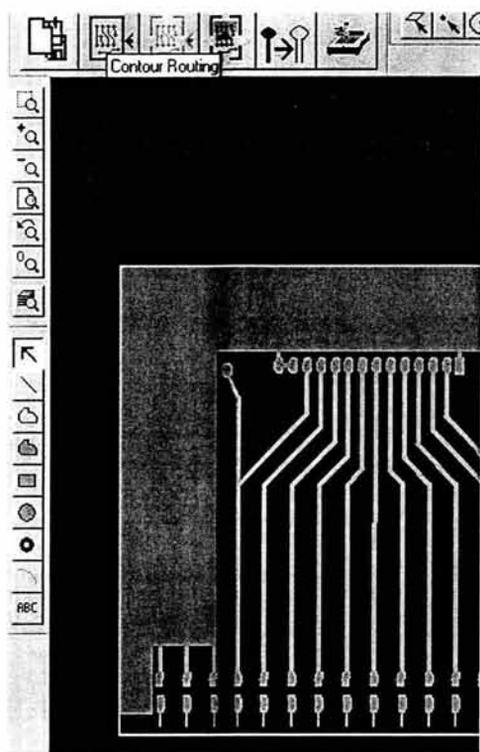


Si queremos importar el:	Extensión del archivo	Layer	Aperture List
Top Layer	gtl	TopLayer	gtl
Bottom Layer	gbl	BottomLayer	gbl
Keep Out Layer	gko	BoardOutline	gko
Nc Drill	txt	DrillUnplated	drl

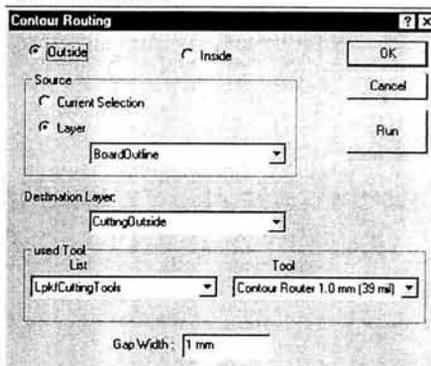
En todos los casos, el tipo de archivo es *Gerber X y*, la opción *Trailing and Leading Zeroes present* debe seleccionarse.

Nota: Cuando se importa el archivo Nc Drill de Protel DXP, aunque aparece una ventana de error, los orificios están correctamente posicionados, por lo que se puede ignorar este aviso. Cuando el archivo Nc Drill proviene de Protel 99SE se sigue otro procedimiento. Ver *Nota 2*.

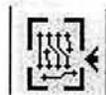
Después de importar estos archivos, ya tenemos listo nuestro circuito impreso en Circuit Cam y ahora podemos prepararlo para mandarlo a la máquina vía el software **BOARD MASTER**.



Si queremos que al terminar el circuito impreso la máquina corte el área correspondiente al circuito del resto de la placa de cobre, podemos usar la función *Contour Routing*. Se accesa a ella desde el icono *Contour Routing* o del menú *Edit*. En la ventana que aparece se selecciona si el corte será por fuera o por dentro de la línea de *Keep Out Layer*, o si se hará en la selección que previamente se haya hecho. De acuerdo al ancho del corte deseado, se seleccionará la herramienta. Al terminar las asignaciones, dar clic en *RUN*.

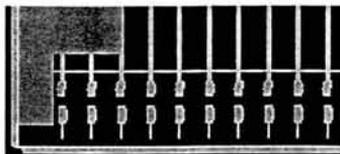
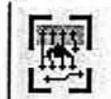


Aparece la ruta en donde irá el corte. Si se quiere dejar puntos de apoyo en el circuito sobre el resto de la placa de cobre, se puede usar la función *Breakout Tab*. Para ello, primero se da un clic fuera del *Keep Out Layer* cerca de una esquina, de modo que sobre la línea del *Contour Routing*, aparezca un asterisco. Al dar clic en el icono *Breakout Tab* el asterisco se va alejando de la esquina, de esta forma se ha dejado un punto de apoyo.

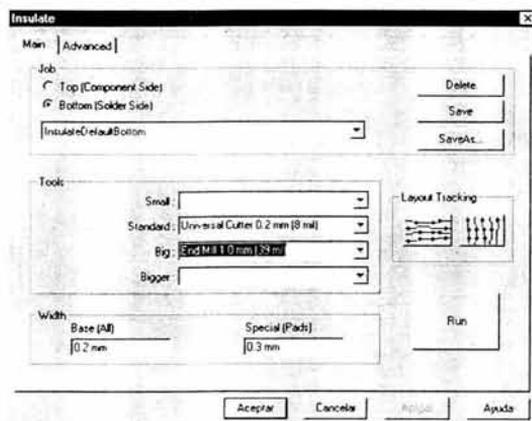




Para remover el cobre del circuito y solamente dejar las pistas, en el menú *INSERT* se selecciona **Rubout Area** y se selecciona la capa (layer) de la que se removerá el cobre. Otra forma de acceder a **Rubout Area** es por medio de su icono. Seleccionar el área de la que se quiere remover el cobre.



Ya seleccionada el área, del menú *EDIT* seleccionar **Insulate**, o bien por medio de su icono.



Cuando se accede a la función **Insulate** por medio del menú *Edit*, aparece una ventana en la que se debe seleccionar la capa en la que se removerá el cobre, la herramienta que removerá el cobre, y la forma en que el plotter (la máquina) se moverá al quitar el cobre.

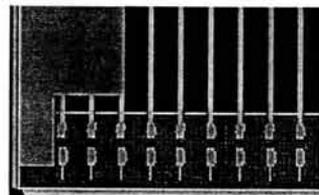
Al terminar de elegir las opciones, dar clic en **RUN**

Esta ventana no aparece cuando se da clic en el icono **Insulate**.

Nota 3: El plotter quita el cobre con la herramienta que en el la ventana *Insulate* aparece como **Big**, por lo tanto, se debe asegurar de contar con dicha herramienta, pues de lo contrario, al usar una herramienta distinta a la que pide el programa, no se obtendrán los resultados esperados.

Aparece la forma en que quedará el circuito. Si no se está conforme, al hacer clic en el icono deshacer se elimina la última acción, entonces, se puede repetir el procedimiento.

Por último, se da clic en el icono **Export LpkfCircuitBoardPlotter** para exportar la información del circuito impreso al plotter.



Este archivo se guarda en la misma dirección de los gerbers. En caso de tener abierto el **BOARD MASTER**, el archivo automáticamente aparece en el visualizador. De lo contrario, se importa el archivo de extensión **LMD**.

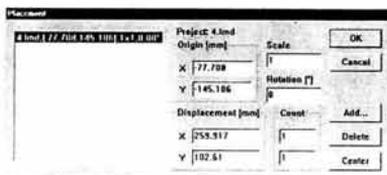
BOARD MASTER

Para trabajar con *Board Master* es necesario primero encender la máquina. Al iniciar el programa observamos en color gris el área de trabajo de la máquina. Es en esta área en donde la máquina es capaz de trabajar y mientras las dimensiones de nuestro circuito no la excedan, no tendremos problemas.

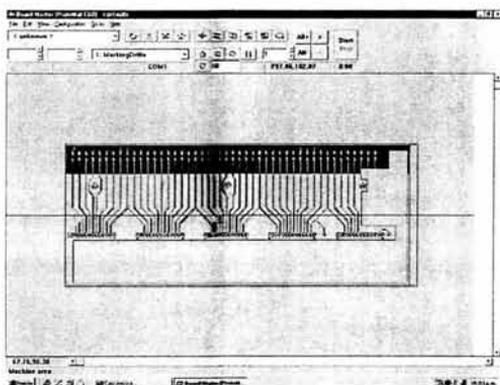
En el menú **FILE**, en la opción **IMPORT**, es donde indicamos al software la ubicación de nuestro archivo **LMD**.



Una vez importado, el circuito aparece al centro del área de trabajo, esta posición puede ser modificada a nuestro gusto. Para ello, damos un clic derecho sobre el circuito para que aparezca la ventana **PLACEMENT**. En esta ventana asignamos las coordenadas en **x** e **y** correspondientes a la posición en que queremos colocarlo.



Si requerimos de **más** de una tableta del mismo circuito, podemos realizarla al mismo tiempo y con el mismo archivo. En la opción **count** del menú **Placement** se indica el número de copias del circuito que se realizarán, se pueden colocar tanto en forma horizontal como **vertical**. La separación entre ellos se puede modificar a gusto propio, y se asigna en la opción **displacement** del mismo menú.



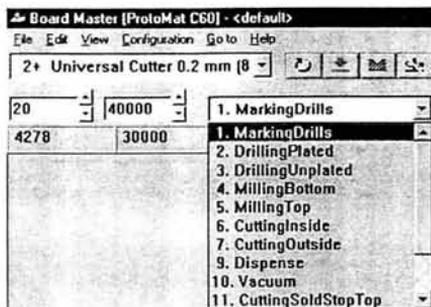
Una vez importado el archivo **LMD**, en la pantalla veremos algo como lo que se muestra en la figura.

La línea negra que divide en dos el área de trabajo (área gris), corresponde a región en que se pueden colocar los pernos de sujeción. En estos pernos quedarán insertadas tanto la tableta de protección (tabla blanca), como la placa de cobre en que haremos el circuito impreso.

A la intersección de esta línea con una pequeña línea perpendicular corresponden las coordenadas (0,0) y se le conoce como la posición **home**.

Observamos que aparece en uno de los recuadros la leyenda “*unknown*”. Esta corresponde a la herramienta que tiene puesto en ese momento el cabezal de la máquina.

En otro de los recuadros se visualiza el texto “*1. Marking drills*”, que corresponde a la etapa en que se encuentra el proceso de realización del circuito impreso. Puede observarse que sigue una numeración, pero esto no implica que sea necesario seguir ese orden.



Marking drills utiliza la herramienta 1* **Universal Cutter 0.2mm**, y se encarga de hacer una pequeña marca en donde se hará el perforado de los hoyos que tenga nuestro circuito. Esto con el objeto de evitar que la broca al momento de perforar, se desvíe haciendo que el hoyo se haga en una posición indeseada.

Por cuestiones de software, para perforar, se debe seleccionar la opción 3. **Drilling Unplated**, la herramienta que debe utilizarse

es la **Spiral Drill 0.9mm**.

Para fijar los pernos de sujeción a la mesa de trabajo, se debe utilizar la herramienta **Spiral Drill Ref 2.95mm**. El procedimiento es el siguiente:

De acuerdo al tamaño de nuestra placa de cobre, es conveniente que coloquemos los pernos en los extremos del material y si es posible, que quede la misma cantidad de material arriba y debajo de los pernos. Recordemos que los pernos sólo pueden colocarse sobre la línea negra que divide al área de trabajo en 2.



Con este icono movemos el cabezal de la máquina por el área de trabajo, a modo de identificar la ubicación en que quedarán los pernos.

Para colocar los pernos, se sitúan las barras de plástico naranja en las posiciones estimadas, y se coloca la herramienta correspondiente. Entonces encendemos el cabezal con el icono



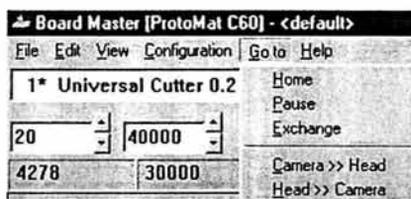
y perforamos.

La forma en que se hace un hoyo que no ha sido asignado en *Circuit Cam*, es seleccionar la etapa 3. **Drilling Unplated** y presionando el icono:



Para poder cambiar la herramienta, el cabezal debe estar en la posición de **Exchange**.

Se puede mandar el cabezal a esta posición vía el menú **GO TO**. Por medio de este menú, podemos mandar el cabezal a la posición de cambio de herramienta, la coordenada (0,0) o a una coordenada llamada pausa, que aleja el cabezal del área de trabajo permitiéndonos maniobrar perfectamente sobre nuestro circuito.



Después de perforar el plástico naranja, se hace lo mismo para perforar la tableta de protección y la placa de cobre. Solo se varía la altura a la que se coloca la herramienta en el cabezal.

Una vez fijado nuestro material a la mesa de trabajo, podemos comenzar con la elaboración de nuestro circuito impreso.

Comenzamos con la etapa 1. *Marking Drills*, para guiar la broca al momento de perforar.

En la etapa 3. *Drilling Unplated*, perforamos los hoyos de nuestro circuito.

En la etapa 4. *Milling Bottom* hacemos las pistas de la cara inferior del circuito y removemos el excedente de cobre.

En la etapa 5. *Milling Top* se hacen las pistas y se remueve el cobre de la cara superior del circuito.

En la etapa 6. *Cutting Inside* se corta el circuito del resto del material, el corte va por dentro del *Keep Out Layer*.

En la etapa 7. *Cutting Outside* se corta el circuito del resto del material, el corte va por fuera del *Keep Out Layer*.

En cada paso se debe seleccionar la parte del circuito que se va a realizar. Si estamos seguros de querer hacer el circuito en un solo paso, presionamos el botón **All +** y después **Start**.



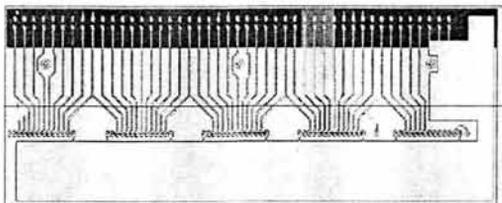
De lo contrario, podemos seleccionar parte del circuito, por ejemplo, para rehacer una parte que no nos haya agradado.

Podemos seleccionar una pista completa, por ejemplo, con el icono presionado seleccionamos los componentes deseados y damos clic en el icono + para darlo de alta. La selección cambia de tono a un verde claro, y ya podemos dar clic en el botón **Start**.



Si solo queremos seleccionar una parte de una pista, se utiliza este icono. Una vez seleccionada la parte de interés, se da clic en el botón + y luego en el botón **Start**.





La zona que trabajará la máquina será la que esté de color claro. El no tener seleccionada alguna parte del circuito al momento de presionar el botón *Start*, resultará en que la máquina no realice acción alguna.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. LUIS W. ALVAREZ, ET AL. *SCIENCE*, 167 (1970) 832.
- [2]. LOS RAYOS CÓSMICOS: MENSAJEROS DE LAS ESTRELLAS.
JAVIER A. OTAOLA, JOSÉ F. VALDEZ-GALICIA
COLECCIÓN LA CIENCIA DESDE MÉXICO/ 108
FONDO DE CULTURA ECONÓMICA 1992
- [3]. COSMICS RAYS AT EARTH
RESEARCHER'S REFERENCE MANUAL AND DATA BOOK
PETER K F GRIEDER
INSTITUTE OF PHYSICS UNIVERSITY OF BERN
BERN, SUIZA 2001
- [4]. LA GRAN ILUSIÓN II, LOS CUARKS
JORGE FLORES VALDÉS
COLECCIÓN LA CIENCIA DESDE MÉXICO/ 22
FONDO DE CULTURA ECONÓMICA 1995
- [5]. COSMIC RAYS
TK GAISSER & T STANEV
BARTOL RESEARCH INSTITUTE, UNIVERSITY OF DELAWARE
E. U. A. 2002
- [6]. PARTICLE DATA GROUP
K. HAGIWARA ET AL.
PHYSICS JOURNAL OCTUBRE 2003
- [7]. LAS RADIACIONES II. EL MANEJO DE LAS RADIACIONES NUCLEARES.
JORGE RICKARDS CAMPBELL Y RICARDO CAMERAS ROSS
COLECCIÓN LA CIENCIA PARA TODOS
SEGUNDA EDICIÓN 1999
FONDO DE CULTURA ECONÓMICA
- [8]. PARTÍCULAS SUBATÓMICAS
STEVEN WEINBERG
1983 NEW YORK
SCIENTIFIC AMERICAN BOOKS INC
- [9]. ESTUDIO SOBRE UN DETECTOR DE CENTELLEO SENSIBLE A LA POSICIÓN
JUAN MANUEL LÓPEZ
TESIS DE LICENCIATURA EN FÍSICA, FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM, 1998

- [10]. INTRODUCTION TO RADIATION DETECTORS AND ELECTRONICS
HELMUTH SPIELER
PHYSICS DIVISION
LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY
E. U. A. 1999
- [11]. TECHNIQUES FOR NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS EXPERIMENTS
A HOW TO APPROACH.
WILLIAM R. LEO
SECOND EDITION 1994
SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG
PRINTED IN GERMANY
- [12]. SISTEMA MULTILÁMBRICO DE DETECCIÓN PARA ESTUDIOS DE DISPERSIÓN
ELÁSTICA.
JOSÉ RUBÉN ALFARO MOLINA
TESIS DE DOCTORADO EN CIENCIAS (FÍSICA), FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM,
2000
- [13]. PRINCIPLES OF OPERATION OF MULTIWIRED PROPORTIONAL AND DRIFT CHAMBERS
F. SAULI
ACADEMIC TRAINING PROGRAMME OF CERN
GENEVA 1977
- [14]. INTRODUCTION TO EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS
FERNOW, RICHARD C.
BRITISH LIBRARY CATALOGUING IN PUBLICATION DATA
CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS 1986
- [15]. ELECTRONIC INSTRUMENT DESIGN
ARCHITECTING FOR THE LIFE CYCLE
KIM R. FOWLER
OXFORD UNIVERSITY PRESS, INC.
E. U. A. 1996
- [16]. A MUON DETECTOR TO BE INSTALLED AT THE PYRAMID OF THE SUN
R. ALFARO, E. BELMONT-MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LÓPEZ-
ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTÍNEZ-DÁVALOS, M. MORENO AND A.
MENCHACA-ROCHA.
REVISTA MEXICANA DE FÍSICA, VOL. 49, SUPLEMENTO 4, PÁGINAS 54-59, MÉXICO
2003
- [17]. ASTRO PARTICLE PHYSICS, VOL. 18, PÁG. 107, AÑO 2002
- [18]. IPC-4101 REFERENCE CHART
SITIO WEB: [HTTP://WWW.STANDARDPC.COM/IPC4101.HTM](http://www.standardpc.com/ipc4101.htm)

- [19]. G. CHARPAK, ANNU. REV. NUCLEAR SCI. 20, 195 (1970)
- [20]. R. BOUCLIER, G. CHARPAK, Z. DIMCOWSKI, G. FISHER, F. SAULI, G. COIGNET AND G. FLÜGGE, NUCLEAR INSTRUMENTS METHODS, VOL. 88, PÁG.149 (1970)
- [21]. RADIOGRAPHIC IMAGING WITH COSMIC-RAY MUONS
REVISTA NATURE, VOL. 422, PÁG. 277, MARZO 2003
- [22]. FLUX: A DETECTOR-INDEPENDENT QUANTITY
SITIO WEB: [HTTP://WWW2.SLAC.STANFORD.EDU/VVC/COSMICRAYS/TOURSTOP2.HTM](http://www2.slac.stanford.edu/vvc/cosmicrays/tourstop2.htm)
- [23]. C. MAZUR AND M. RIBRAG, NUCLEAR INSTRUMENTS METHODS, VOL. 212,
PÁGINAS 203-208, AÑO 1983.

SITIOS ELECTRÓNICOS:

[HTTP://WWW2.SLAC.STANFORD.EDU/VVC/COSMICRAYS/DEFAULT.HTM](http://www2.slac.stanford.edu/vvc/cosmicrays/default.htm)
[HTTP://WWW.AUGER.ORG.AR/ARGENTINA/HISTORIA.SHTML](http://www.auger.org.ar/argentina/historia.shtml)
[HTTP://PDG.LBL.GOV](http://pdg.lbl.gov)
[HTTP://WWW.DXLC.COM/SOLAR/](http://www.dxlc.com/solar/)
[HTTP://DECAP.COM/SPANISH/BLANDA/ALE_B2.HTM](http://decap.com/spanish/blanda/ale_b2.htm)
[HTTP://WWW-ESD.FNAL.GOV/ESD/CATALOG/INTRO/INTRONIM.HTM](http://www-esd.fnal.gov/esd/catalog/intro/intronim.htm)
[HTTP://WWW.CSX.ES](http://www.csx.es)
[HTTP://WWW.CAMBERRA.COM](http://www.camberra.com)
[HTTP://WWW.LECROY.COM/LRS/APPNOTES/INTROCAML/INTROCAML.HTM](http://www.lecroyc.com/lrs/appnotes/introcaml/introcaml.htm)
[HTTP://WWW.PHILLIPSSCIENTIFIC.COM/PDF/740DS.PDF](http://www.phillipsscscientific.com/pdf/740ds.pdf)
[HTTP://WWW.ORTEC-ONLINE.COM/ELECTRONICS/AMP/855.HTM](http://www.ortec-online.com/electronics/amp/855.htm)
[HTTP://WWW.ORTEC-ONLINE.COM/ELECTRONICS/AMP/FTA820A.HTM](http://www.ortec-online.com/electronics/amp/fta820a.htm)
[HTTP://WWW.ORTEC-ONLINE.COM/ELECTRONICS/DISC/CF8000.HTM](http://www.ortec-online.com/electronics/disc/cf8000.htm)
[HTTP://WWW.ORTEC-ONLINE.COM/ELECTRONICS/PREAMP/142C.HTM](http://www.ortec-online.com/electronics/preamp/142c.htm)
[HTTP://WWW.LECROY.COM/LRS/DSHEETS/365AL.HTM](http://www.lecroyc.com/lrs/dsheets/365al.htm)