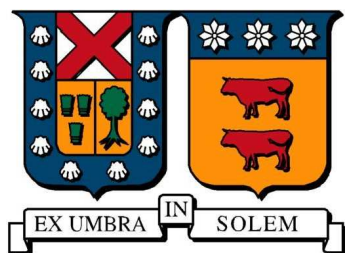


**UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO- CHILE**



**ESTIMACIÓN DE EFICIENCIA DE
DETECCIÓN DE FOTONES EN
MULTIPIXEL PHOTON COUNTER MPPC**

RIMSKY ROJAS CABALLERO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRÓNICO MENCIÓN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

PROFESOR GUÍA: CÉSAR SILVA JIMÉNEZ

PROFESORES CORREFERENTES: SERGEY KULESHOV

RICARDO OLIVARES VÉLIZ

**MATERIAL DE REFERENCIA, SU USO NO INVOLUCRA
RESPONSABILIDAD DEL AUTOR O DE LA INSTITUCIÓN**

Agosto- 2013

*A toda mi familia y mi pareja
que siempre han confiado en mí, se han
alegrado con mis triunfos y apoyado
en los momentos difíciles.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi padre, madre y hermana por haberme alentado a pasar del colegio técnico a estudiar Ingeniería.

Agradezco también a mi familia en Belloto, Playa Ancha, Copiapó y Huatulame por el apoyo constante, en especial a mi hermana, a mi tío, a mi madre y a mi pareja.

A mis amigos por las horas de desestrés necesarias en la universidad.

Quiero agradecer al proyecto BASAL de CCTVAL y al departamento de física por el financiamiento del proyecto.

Por último, a mis profesores referente y correferente por su buena disposición, al Centro estudiantil de Robótica por ampliar mis conocimientos y capacidades, y a todo el team SiLab que me ayudaron en el desarrollo de mi memoria.

Resumen

Los *Multipixel Photon Counters* o MPPC, son dispositivos contadores de fotones contruidos sobre un sustrato de silicio. Un MPPC es una matriz de cientos o miles de pequeños fotodiodos de avalancha APD (*Avalanche Photo diodes*); éstos también son conocidos como SiPM (*Silicon Photo Multipliers*) ya que son el remplazo en silicio de los conocidos tubos fotomultiplicadores PMT (*Photo-Multiplier Tube*) ámpliamente utilizados en física de alta energía. En este trabajo se caracteriza un MPPC de 3600 pixeles por canal. Cada canal es de 3x3 mm y este MPPC posee 16 canales. Este elemento es encapsulado en un paquete de 15x20 mm.

El MPPC considerado presenta una ganancia del orden de 10^5 conseguida con tensiones alrededor de los 70V en contraste con los PMT, cuyas tensiones de operación superan los 600V. En este trabajo se mide empíricamente la ganancia, el *dark noise*, la tensión de ruptura y la eficiencia de detección de fotones o PDE (*Photo-Detection Efficiency*). Este último parámetro es de gran interés cuando se desea conocer la cantidad de fotones medidos. Se ha encontrado que el PDE es de alrededor de 24%, y es importante determinar esto ya que el fabricante no provee un valor exacto para este parámetro.

Como estadística de las mediciones a más de 1500 MPPC, se han determinado la características lineales tanto del *dark noise* como de la ganancia con respecto a la sobretensión de polarización. El PDE en cambio presenta un comportamiento cuadrático con respecto a la sobretensión.

Como resultado de las mediciones realizadas se logró obtener una completa base de datos con las características *dark noise*, ganancia y PDE versus tensión de polarización para cada uno de los MPPC, siendo posible llevar a cada uno a un mismo punto de operación si fuese necesario.

Palabras claves: MPPC, eficiencia de detección de fotones, PDE.

Abstract

The Multipixel Photon Counters (MPPC) are photon-counter devices built on a silicon substrate. One MPPC is a matrix of hundred or even thousands of small avalanche photo-diodes (APD), these are also known as SiPM or Silicon Photo-Multipliers because they are silicon replacement of the Photo-multiplier tube PMT, extensively used on high energy physics. On this study were characterized 3600 pixels-per-channel MPPC. Each channel is 3x3mm in size and this MPPC has 16 channels. The entire device is encapsulated in a 15x20 mm package.

The MPPC under consideration presents a gain in the order of 10^5 achieved with about 70[V] bias voltage in contrast with PMT's which operation voltages exceed 600[V]. In this work the gain, dark-noise, breakdown voltage and photo-detection efficiency (PDE) are empirically measured. PDE is specially of interest as it allows to estimate the amount of measured photons. It is found that PDE is approximately of 24 % and this is very important because manufacturer doesn't provide an exact value for this parameter.

From statistics of more than 1500 measured MPPCs, lineal fit was determined for the dark-noise and gain respect to over-voltage. A quadratic fit was found for PDE respect to over-voltage.

As a result of all performed measurements it was possible to obtain a complete database with dark-noise, PDE, gain and breakdown voltage characteristics for each MPPC. Now it is possible to set each MPPC to the same operation point if necessary.

Keywords: MPPC, photo-detection efficiency, PDE.

Glosario

APD Avalanche Photo-diode, fotodiodo de avalancha.

MPPC Multi-Pixel Photon Counter.

PDE Photo Detection Efficiency, Eficiencia de detección de fotones.

PMT Photo Multiplier Tube, tubo foto-multiplicador.

SiPM Silicon Photo Multiplier, foto-multiplicador de silicio..

WS Wavelength Shifting.

Índice general

Resumen	III
Abstract	IV
1. Introducción	1
1.1. Aplicaciones y contexto	1
1.2. Qué es un MPPC	3
1.3. Conceptos fundamentales	6
1.4. Características de un MPPC	7
1.4.1. Cuentas oscuras o Dark Counts	8
1.4.2. Ganancia	8
1.4.3. Crosstalk óptico	9
1.4.4. Eficiencia de detección de fotones	9
1.5. Procedimiento de trabajo	9
1.5.1. Construcción del setup	10
1.5.2. Adquisición de datos y automatización	11
1.5.3. Calibración del setup	11
1.5.4. Análisis de datos	11
2. Caracterización del MPPC	12
2.1. Aplicaciones e importancia de la caracterización	12
2.2. Características a determinar	13
2.2.1. Tensión de ruptura	15
	VI

2.2.2. Ganancia	17
2.2.3. Dark Noise	18
2.2.4. Eficiencia	19
2.3. Fotones detectados	21
2.4. Metodología del trabajo	22
3. Diseño y construcción del setup experimental	23
3.1. Descripción general	23
3.2. Caja negra	24
3.3. Fibra de centelleo	27
3.4. Generación y divisor de luz	29
3.5. Entrega de fotones al MPPC	31
3.6. Electrónica y equipos utilizados	33
3.7. Conexión de los equipos y puesta en marcha	36
3.8. Realización de una medición	38
3.9. Automatización del proceso	39
4. Resultados experimentales	41
4.1. Calibración	41
4.2. Procesamiento de los datos	44
4.3. Medición de un MPPC	52
4.4. Resultados generales	62
5. Conclusiones	68
Apéndices	73
A. Cabecera de archivo guardado por el programa de adquisición.	73
B. Script para medición 1	74
C. Script para medición 2	76

Índice de cuadros

4.1. Datos obtenidos al graficar la ganancia v/s tensión. con temperatura de 37°C al interior de la caja oscura BDV: BreakdownVoltage. C: Capacitor ficticio. G: Ganancia obtenida a BDV promedio + 0.9[V]	54
4.2. Número de fotones detectados y PDE calculado para 0.9[V] de sobretensión. Fotones incidentes según calibración.	60

Índice de figuras

1.1. Dibujo técnico de un MPPC con dimensiones en [mm].	4
1.2. Fotografías macro de un MPPC. A la derecha se indica 1 APD, que corresponde a uno de los cuadrados que se logran diferenciar.	5
1.3. Fotografías de un MPPC tomadas con un microscopio. A la derecha cada cuadrado negro mide $50 \times 50 \mu m$ y es un pixel o APD.	5
1.4. Conexión interna de un MPPC y circuito básico de polarización.	6
2.1. Pulsos producidos y correspondencia con histograma según fabricante.	13
2.2. Histograma esperado idealizado.	15
2.3. Gráfico de la ganancia versus la tensión de alimentación.	16
2.4. Histograma de los números entregados por el QDC.	18
2.5. Ejemplo de histograma obtenido al realizar una medición en ausencia de luz y después de centrar el pedestal en cero.	19
2.6. Caracterización de la luz a inyectar en cada uno de los canales del MPPC.	20
2.7. Ejemplo de la característica de PDE versus tensión obtenida.	21
3.1. Caja oscura con todos sus elementos.	24
3.2. Mitad de la caja oscura, corresponde a la parte izquierda en la figura 3.1.	25
3.3. Conectores de la caja oscura. a) Conectores frontales: de izquierda a derecha se encuentran los conectores de alta tensión de PMT (830[V]) y de MPPC (70[V]), señal del PMT, sensor de temperatura, 16 conectores tipo LEMO de los canales de medición del MPPC y polarización ($\pm 5[V]$). b) Conectores posteriores: conectores de polarización y de señal adicionales.	26

3.4. Componentes instalados.	26
3.5. Sección transversal y longitudinal de la fibra WS, y espectro de absorción y emisión. . .	28
3.6. Fotografía de la pieza utilizada para pulir junto al líquido de pulido utilizado para el acabado.	29
3.7. Divisor de luz utilizado. Posee 18 agujeros equidistantes del centro para poder realizar pruebas. a) Divisor recién mecanizado. b) divisor ya pintado y comenzando la instalación de las fibras WS.	30
3.8. Pruebas de pintura utilizadas para pintar el cilindro. 1) esmalte sintético en spray. 2) tempera. 3) esmalte sintético líquido. 4) Oleo. 5) pintura ARTEL (pintura utilizada para pintar el divisor de luz.)	31
3.9. a) Pieza plástica diseñada para fijar la fibra WS. b) Fibras WS pulidas. c) Pieza plástica instalada.	32
3.10. Piezas para afirmar el MPPC a medir.	32
3.11. Entrega de fotones al MPPC y al PMT.	33
3.12. Polarización del PMT.	34
3.13. Desarrollo de PCB para polarización de PMT.	34
3.14. Esquema de conexiones del <i>setup</i>	36
3.15. <i>Setup</i> construido.	37
3.16. Conexión del MPPC para su posterior medición.	38
3.17. Diagrama de flujos de la medición del MPPC.	40
4.1. Medición de un sólo canal. Se observa que el cartón negro sólo deja descubierto un orificio por donde saldrán fotones que corresponde al primero de arriba a la izquierda. .	42
4.2. Forma de onda producida por un MPPC (abajo $20[mV/div]$) con la señal de GATE (arriba $1[V/div]$), la escala temporal es $20[ns/div]$. Note que se ha configurado un nivel de persistencia en el osciloscopio.	45
4.3. Pulsos producidos y correspondencia con histograma según fabricante.	46
4.4. Medición en ausencia de luz.	47
4.5. Histogramas de mediciones con luz, a) se realiza un ajuste con una gauseana del <i>peak</i> correspondiente al pedestal. b) se ha restado la posición del pedestal y se ha realizado un ajuste de una gauseana al primer peak.	49

4.6. Histogramas obtenidos para el PMT, a) sin luz. b) con luz habiendo restado ya la posición del pedestal.	51
4.7. Curva provista por el fabricante. PDE vs longitud de onda.	52
4.8. Ganancia versus tensión de polarización para el canal 1 del MPPC 1984.	53
4.9. Ganancia versus sobretensión para todos los canales del MPPC.	56
4.10. Ganancia versus tensión para todos los canales del MPPC.	57
4.11. a)Numero de fotones detectados versus tensión de polarización para el canal 1 del MPPC 1984. b) fotones detectados por el PMT.	58
4.12. PDE versus tensión de polarización para el canal 1 del MPPC 1984.	59
4.13. Estimación de eficiencia de detección de fotones por todos los canales del MPPC vs sobretensión.	61
4.14. Histograma de la tensión de ruptura y de la ganancia promedio a 0,9[V].	62
4.15. Histograma de <i>dark noise</i> y PDE a 0,9[V] de sobretensión.	63
4.16. <i>Dark noise</i> vs sobretensión.	64
4.17. Ganancia vs sobretensión.	65
4.18. PDE vs sobretensión.	65
4.19. Gain vs tension.	66
4.20. PDE vs tension.	67

Capítulo 1

Introducción

1.1. Aplicaciones y contexto

La detección de pequeñas cantidades de luz se hizo posible hace ya casi un siglo atrás, cuando en el año 1912 Elster y Geitel crearon el primer fototubo. El fototubo utiliza como principio de funcionamiento el efecto fotoeléctrico descubierto en 1887 por Heinrich Hertz y descrito posteriormente por Albert Einstein en 1905 [1]. Pasaron más de 30 años para que saliera al mercado el primer fototubo de emisión secundaria lanzado por el laboratorio RCA en enero de 1936 [2]. En estos últimos el electrón liberado mediante efecto fotoeléctrico en el cátodo, es acelerado por un campo eléctrico, generado con alta tensión, hacia un cátodo auxiliar o dynodo en el cual el electrón ahora con más energía cinética, libera más de un electrón los cuales son recolectados por un ánodo. Más etapas auxiliares son utilizadas hoy en día para conseguir una mayor amplificación en los conocidos tubos fotomultiplicadores (PMT) con el fin de conseguir mayor poder de resolución de energía y de esta forma obtener la lectura de fotones individuales. Sin embargo, los PMTs poseen dos grandes desventajas: poseen una alta sensibilidad a campos magnéticos y son de un elevado precio. A esto se le suma la limitante de tamaño, ya que impone una limitante en resolución espacial y la limitante de una fuente de alimentación de alta tensión, típicamente mayores a los 1000[V].

Las aplicaciones de los PMT desde hace algunos años se extienden a aplicaciones médicas, principalmente en las imágenes médicas (MRI-PET) y análisis de sangre; en instrumentación científica en física de alta energía (grandes detectores de partículas) y en espectroscopía; aplicaciones comerciales como scanner de equipaje y detectores de elementos radioactivos entre otras aplicaciones.

En muchas aplicaciones, principalmente en las tomografías médicas y en física de alta energía, los PMT están inmersos en campos magnéticos fuertes, lo que dificulta la utilización de estos elementos. Por otra parte, la tendencia es a aumentar la magnitud de estos campos magnéticos, aumentar la densidad de sensores, aumentar la vida útil de éstos y por si fuera poco, a reducir los costos. Esto promueve la búsqueda de una alternativa a los PMTs que ayuden a cumplir estos objetivos.

Una alternativa a los PMTs que permite aumentar la densidad y lograr inmunidad frente a campos magnéticos es el diodo PIN. El diodo PIN incluye una capa interna de semiconductor intrínseca (I) entre las capas de semiconductores P y N de un diodo de juntura PN convencional y de ahí su nombre. En la práctica sin embargo, la capa interna se logra con semiconductor P o N de bajo nivel de dopado y por tanto de alta resistividad. La zona de agotamiento se genera normalmente en la juntura en los diodos PN convencionales y corresponde a una zona de alto campo eléctrico que depende de la tensión de polarización, En los diodo PIN en cambio, la zona de agotamiento se extiende por casi toda de la capa intrínseca y el campo eléctrico se mantiene casi constante y poco dependiente de la tensión. Esto aumenta el área en donde un fotón incidente puede generar un par hueco-electrón.

El diodo PIN es ampliamente utilizado en algunos de los más grandes experimentos en física de alta energía (CLEO, L3, BELLE, BABAR, GLAST). Sin embargo, este diodo no posee una ganancia interna, por lo cual se requiere de amplificadores de carga altamente sensibles, éstos poseen un nivel de ruido que hace imposible la detección de sólo unos pocos fotones.

Otra alternativa a los PMT se viene desarrollando desde los años 60, con el surgimiento de los fotodiodos de avalancha o APD (Avalanche photo-diode) [3, 4]. Un APD es básicamente un diodo operando en modo Geiger, es decir, polarizado ligeramente por sobre la tensión de ruptura y conectado en serie con una resistencia de extinción. La operación en modo Geiger básicamente provoca que en la zona de agotamiento se produzca un gran campo eléctrico. Cuando un fotón incidente genera un par hueco-electrón en la zona de agotamiento, el electrón liberado es acelerado con este campo eléctrico desencadenando una avalancha de electrones. He aquí la principal diferencia en funcionamiento del APD

con respecto al diodo PIN y es ésto lo que provee al APD de una ganancia interna. La avalancha de electrones generada en el APD es en el fondo un pulso de corriente que circula también por la resistencia de extinción. Al aumentar la tensión en esta resistencia, la tensión en el diodo baja sacando al diodo del modo Geiger y extinguiendo la avalancha, de ahí su nombre.

La gran desventaja de un APD es que puede detectar un sólo fotón, pero al conectar muchos de estos APD de tamaño micrométrico en paralelo, se consigue crear un dispositivo que en funcionamiento es muy similar a un tubo fotomultiplicador, pero de Silicio. Este nuevo dispositivo posee alta resistencia a campos magnéticos [5], es de tamaño reducido, requiere baja tensión de polarización, posee una larga vida útil y también es económico. Estos dispositivos son comúnmente conocidos como Silicon Photomultipliers (SiPM)[4, 6, 7].

1.2. Qué es un MPPC

Un MultiPixel Photon Counter tal como lo dice su nombre es un contador de fotones de múltiples pixeles, cada uno de los cuales consiste en un foto-diodo de avalancha o APD. Cada uno de estos foto-diodos funciona en modo Geiger, es decir, operan cerca de la tensión de ruptura y son capaces de captar sólo un fotón de forma independiente. La conexión en paralelo de cientos de estos APD permite contar o detectar hasta algunas decenas de fotones sin pérdida de eficiencia. Un MPPC es una de las versiones más recientes de SiPM, con un tamaño de cada APD o pixel de entre 25 a 100 micrómetros, fueron lanzados al mercado en 2006 [8, 9], con una zona activa típicamente de entre 1x1[mm] a 3x3[mm], tensiones de operación de 50 a 100[V], y a precios casi 10 veces menores que los antiguos PMT.

En este trabajo se utiliza un modelo en particular de MPPC, que a pesar de su pequeño tamaño como se observa en la figura 1.1, es probablemente el más grande del mercado hoy en día.

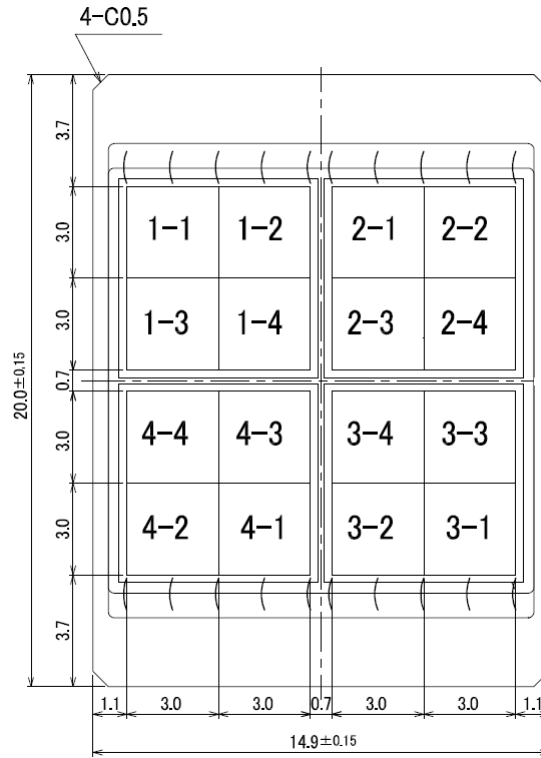


Figura 1.1: Dibujo técnico de un MPPC con dimensiones en [mm].

Este MPPC posee un tamaño de pixel de $50[\mu m]$ y zona activa de $3 \times 3[mm]$ por canal. En la figura 1.1 se observan 4 divisiones o zonas, cada una de ellas dividida a su vez en 4 subsecciones, cada una de éstas corresponde un canal de medición (16 canales de medición en total). Cada canal de medición consta de 3600 *pixeles* o APD conectados en paralelo, cada uno de los cuales posee su propia resistencia de extinción.

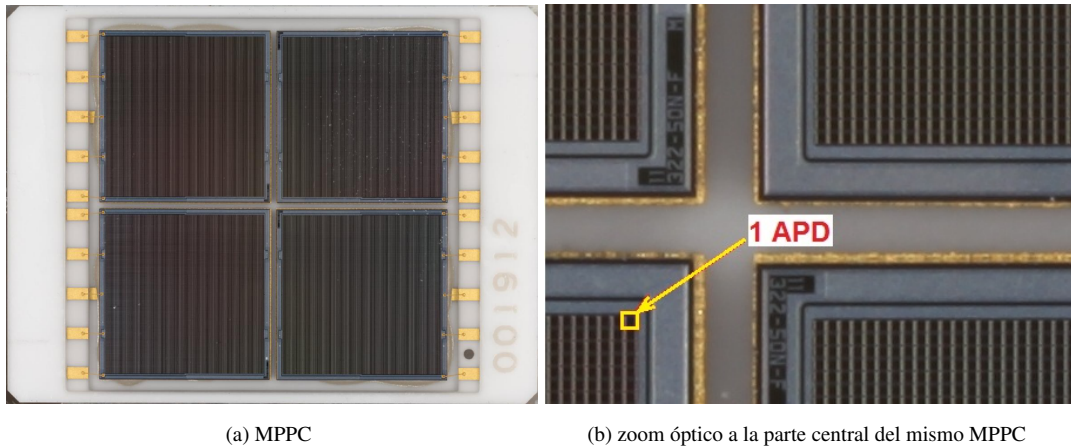


Figura 1.2: Fotografías macro de un MPPC. A la derecha se indica 1 APD, que corresponde a uno de los cuadrados que se logran diferenciar.

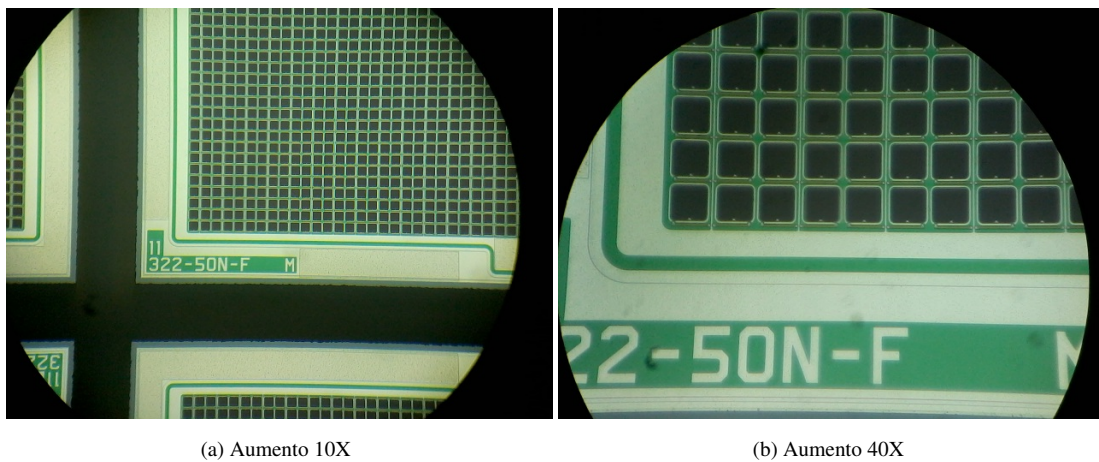


Figura 1.3: Fotografías de un MPPC tomadas con un microscopio. A la derecha cada cuadrado negro mide $50 \times 50 \mu m$ y es un pixel o APD.

Finalmente en la figura 1.2 y 1.3 se observa uno de los MPPC que se caracterizaron en este trabajo. En la foto se observan sólo 4 zonas activas, cada una de éstas está eléctricamente dividida en 4 subsecciones. También se indica en la figura 1.2 uno de los APD del MPPC y se pueden observar

claramente cada uno de éstos en la figura 1.3.

1.3. Conceptos fundamentales

Para comprender el funcionamiento de un MPPC y las características que se calculan en este trabajo se debe comprender primeramente la construcción de éste. Como se mencionó anteriormente, el MPPC modelo considerado en este trabajo, está compuesto 16 canales, cada uno de los cuales posee 3600 *pixeles* o APD conectados en paralelo. Tal como lo define el fabricante [8] la simplificación más básica que se puede hacer de un canal de un MPPC es la de un APD con su resistencia de extinción en serie. El modelo real de un MPPC se compone por la conexión en paralelo de diodos de avalancha en modo Geiger, cada uno con sus respectivas resistencia de extinción propias como se muestra en la figura 1.4a. En la figura 1.4b se muestra la conexión típica de polarización de un MPPC, donde el diodo representa el MPPC completo.

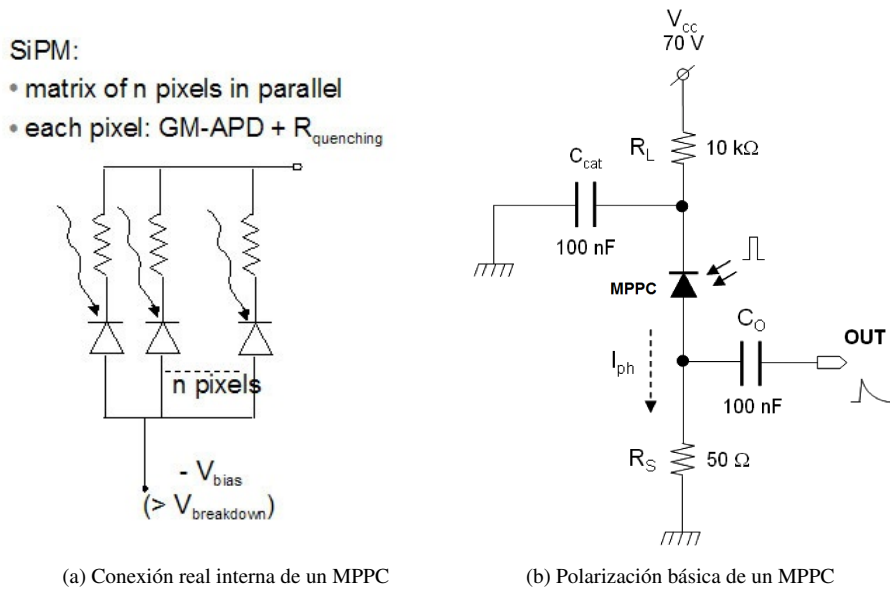


Figura 1.4: Conexión interna de un MPPC y circuito básico de polarización.

El funcionamiento en modo Geiger se puede explicar de la siguiente forma, al aumentar la tensión

de polarización levemente por sobre la tensión de ruptura, se genera un alto campo eléctrico en la zona de agotamiento del diodo. En este punto se puede desencadenar una avalancha por dos motivos: de forma espontánea por efecto del calor o por la incidencia de un fotón. A mayor temperatura del diodo existe mayor probabilidad de que se produzca una avalancha de forma espontánea. El segundo motivo es por la llegada de un fotón a la zona de agotamiento. Cuando esto ocurre existe una probabilidad de que este fotón genere un par hueco-electrón. De generarse este par existe una probabilidad de que el electrón sea acelerado por el campo eléctrico interno del diodo produciendo una avalancha. Cuando se produce una avalancha, ésta es rápidamente extinguida por medio de la resistencia de extinción debido a que la avalancha es un aumento repentino de la corriente que provoca un aumento de tensión en esta resistencia, por tanto lleva a la tensión del diodo por debajo de la tensión de ruptura lo cual naturalmente extingue la avalancha. Si describimos al MPPC cuando está en modo Geiger como un capacitor este proceso puede explicarse en tres modos [8]: carga, descarga y extinción. Al sobrepasar la tensión de ruptura se produce una acumulación de electrones y huecos a ambos lados de la juntura que es equivalente a la carga de un capacitor. Cuando se produce la avalancha este capacitor se descarga, es decir los electrones rompen la juntura y se produce una conducción inversa por el diodo, esto es análogo a una descarga del capacitor (lo cual toma aproximadamente $1[ns]$). Al producirse este *peak* de corriente la tensión baja y se interrumpe la conducción por la juntura del diodo. Mientras la avalancha se extingue se produce una nueva acumulación de electrones y huecos, proceso que toma aproximadamente $50[ns]$. La carga que acumula el APD durante este último proceso se relaciona con la tensión de polarización con la siguiente expresión.

$$Q = C(V_{pol} - V_{rup})$$

Donde C es la capacitancia de un APD o pixel [10] y $(V_{pol} - V_{rup})$ es denominada la sobretensión, es decir, tensión por sobre la tensión de ruptura. En este sentido Q es la carga que almacena un pixel para una tensión de polarización de V_{pol} y que es conducida a través de la resistencia R_S (en la figura 1.4b) cuando se genera la avalancha.

1.4. Características de un MPPC

Lo primero que se debe tener en cuenta en un MPPC es que todos los pixeles de éste están conectados en paralelo, esto quiere decir que todos los APD internos se polarizan con exactamente el

mismo potencial, pero es imposible que todos los APD del mismo canal tengan exactamente la misma tensión de ruptura, ya que es imposible que cada pixel sea exactamente iguales entre si. Ésto produce que no todas las avalanchas producidas tengan la misma amplitud y que la amplitud promedio de éstas sea medible sólo de forma empírica. Además las amplitudes de las avalanchas generadas en un mismo canal tienen distribución gaussiana.

1.4.1. Cuentas oscuras o Dark Counts

Como se mencionó anteriormente, una de las razones por las que se pueden producir avalanchas es por generación espontánea producto de la temperatura. A mayor temperatura y sobretensión, la probabilidad de que se produzcan este tipo de avalanchas aumenta. Además, no es posible detectar cuando una avalancha fue producida por efectos de temperatura o por un fotón incidente. Esta característica negativa debe considerarse al momento de realizar análisis de datos. No obstante es posible determinar la tasa de ocurrencia de estas cuentas oscuras mediante mediciones sin inyección de luz (de modo que todas las avalanchas generadas sean debido a este efecto). La unidad de medida típica es en MHz.

1.4.2. Ganancia

Dado que el MPPC opera en modo Geiger, este posee una ganancia interna tal que permite medir la avalancha generada mediante un osciloscopio u otros dispositivos. La ganancia se define como la carga que es capaz de producir el MPPC dada la incidencia de un fotón. Un fotón puede producir un par hueco-electrón si este posee un rango acotado de energía (de aproximadamente $450[nm]$ a $530[nm]$ de longitud de onda), pero la carga que genera en el silicio es sólo la del electrón, es decir, $1,6 * 10^{-19}[C]$. Este electrón es el que genera la avalancha, por lo que la ganancia se mide con respecto a la carga del electrón, por cada fotón detectado. Por tanto la ganancia del MPPC no es más que:

$$G = \frac{Q[C]}{1,6 * 10^{-19}[C]} = \frac{C(V_{pol} - V_{rup})}{1,6 * 10^{-19}[C]}$$

La capacitancia C es constante para un pixel, pero se observa una dependencia de la ganancia con respecto de la tensión de polarización. Para una sobretensión de $1[V]$ la ganancia se encuentra típicamente entre 10^5 y 10^6 en estos dispositivos.

1.4.3. Crosstalk óptico

El crosstalk óptico es uno de los efectos no deseados que se producen en un MPPC, es uno de los menos estudiados y más difíciles de estimar. Este es básicamente el disparo de un pixel debido exclusivamente al disparo de un pixel vecino. Es decir, al dispararse un pixel existe una probabilidad de que producto de esto, se dispare un segundo pixel vecino produciendo una segunda avalancha para sólo un fotón incidente. El crosstalk óptico aumenta con un aumento en la tensión de polarización y debido a la complejidad de la estimación de este, no se aborda en este trabajo, sin embargo no se descarta su estudio en trabajos posteriores, incluso utilizando los mismo datos ya recolectados.

1.4.4. Eficiencia de detección de fotones

La eficiencia de detección de fotones o PDE (*photo detection efficiency*) es la razón entre los fotones detectados (aquellos que produjeron avalancha) y el total de fotones incidentes. Es decir, es la probabilidad de que al incidir un fotón en la zona activa del MPPC, este produzca una avalancha.

El PDE depende de 3 factores y sigue la siguiente relación

$$PDE = p_f * q * p_a$$

donde: p_f es el factor geométrico o *fill factor* (relación entre el área efectivamente sensible y el área total activa o zona gris en la figura 1.3). El factor q corresponde a la eficiencia cuántica o *quantum efficiency* que es una propiedad física del material, es decir, la probabilidad de que un fotón genere un par hueco-electron. Finalmente el factor p_a corresponde a la probabilidad de que dado un fotón incidente en el área sensible y que genera un par hueco-electrón, se genere una avalancha de electrones. Es este último factor o propiedad la que depende del nivel de polarización del MPPC.

1.5. Procedimiento de trabajo

En esta sección se reporta el procedimiento que se realiza para obtener la estación de medición de MPPC el cual se divide en las siguientes etapas.

- Construcción del *setup*.
- Adquisición de datos y automatización.
- Calibración del *setup*.
- Análisis de datos.

Cada uno de estas tareas fueron fundamentales para el desarrollo del trabajo dado que se espera medir más de mil unidades de MPPC.

1.5.1. Construcción del setup

Esta sección se divide en varias subsecciones que representan cada una de las tareas realizadas para la construcción, pasando por el diseño y construcción de: la caja oscura, el divisor de luz, conexión del divisor de luz con una de las paredes internas, la polarización del PMT y las conexiones realizadas.

- **Caja oscura:** La caja oscura permite el desarrollo del experimento que debe realizarse en ausencia de luz. Se deben considerar todos los elementos que debe contener para su diseño y construcción.
- **Divisor de luz:** El divisor de luz permite la obtención de pocos fotones además de una homogeneidad en la luz que incide en el MPPC.
- **Instalación del divisor de luz:** El divisor de luz está conectado con el MPPC por medio de fibras Wavelength shifting, incluso esta conexión no es trivial.
- **Polarización del PMT:** Para la medición de PDE se utiliza un PMT como referencia, este requiere de una polarización especial la cual se construyó como parte del trabajo.
- **Conexiones de la electrónica:** Una vez teniendo todos los componentes de la instalación se deben conectar todos correctamente.

1.5.2. Adquisición de datos y automatización

Posterior a la construcción física de la instalación de medición se debe realizar la puesta en marcha de la adquisición de datos y el traspaso y almacenamiento de estos datos en un servidor. Posteriormente se trabaja en la automatización de los instrumentos involucrados en la medición, cuyos parámetros deben cambiar constantemente como el generador de pulsos y la fuente de poder que polariza el MPPC. También se definen procedimientos para la conexión y rutinas de prueba para comprobar el correcto funcionamiento antes de realizar una medición.

1.5.3. Calibración del setup

Una vez la instalación se encuentra preparada para tomar datos de forma automática se debe realizar un procedimiento de calibración del *setup* utilizando un diodo PIN para este proceso en conjunto de un PMT, dado que estos son elementos robustos y bien conocidos.

1.5.4. Análisis de datos

Finalmente, una vez teniendo los datos en un servidor y conociendo la calibración se debe realizar un tratamiento de los datos obtenidos y las fórmulas utilizadas para el análisis. El resultado de este análisis es almacenado en archivos para su posterior utilización.

Capítulo 2

Caracterización del MPPC

2.1. Aplicaciones e importancia de la caracterización

Un MPPC es un dispositivo contador de fotones utilizado en aplicaciones en donde se desea detectar luz extremadamente débil, del orden de uno a unos cuantos fotones. El MPPC además posee una alta insensibilidad a campos magnéticos, es por esto que han comenzado a ganarse terreno desde grandes proyectos en física de alta energía a aplicaciones en medicina. En física de altas energías se pueden encontrar en calorímetros, como ALICE, Gluex, o CALICE; adosado a cristales centelleadores o plásticos de centelleo en detectores de muones o partículas de alta energía. En medicina se puede encontrar a los MPPC en máquinas PET (Tomografía por emisión de positrones), en secuenciadores de ADN, analizadores de sangre, citometría de flujos entre otros. [11]

Debido a que un MPPC opera muy cerca de la tensión de ruptura, la caracterización de estos dispositivos es de suma importancia ya que un error de tan sólo 1[V] podría significar el estropear uno, y un error de 0,1[V] significa un cambio significativo en las propiedades de estos, tanto en ganancia como en eficiencia de detección de fotones, entre otras propiedades.

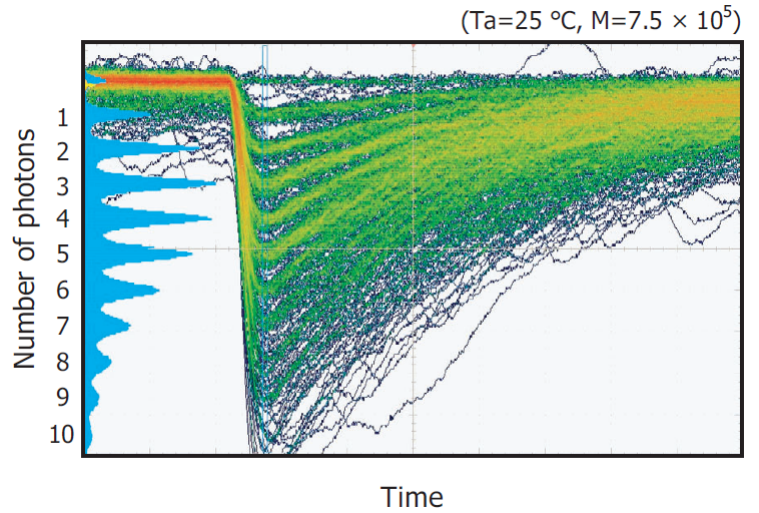


Figura 2.1: Pulsos producidos y correspondencia con histograma según fabricante.

2.2. Características a determinar

Tal como para cualquier sensor, antes de poder utilizar un MPPC se debe conocer perfectamente cómo es que este opera. En este sentido es necesario conocer al menos la tensión de operación y la dependencia de la ganancia con respecto a la tensión de operación, la eficiencia de detección con respecto a la tensión y el ruido que produce con respecto a la tensión (en términos de falsos disparos por segundo). Además, es necesario conocer el tipo de señales que éste genera al detectar fotones para utilizar un sistema de adquisición de datos apropiado.

Las características que se determinan consideran que los datos son adquiridos mediante un sistema de conversión de carga a digital (QDC) como se especifica en el capítulo siguiente. Esto quiere decir que las unidades de medida son unidades de QDC, las cuales según las especificaciones del QDC utilizado corresponde a $0,1[C]$ por unidad.

Un histograma es una representación gráfica de una variable en especial, donde la abscisa corresponde a la variable y las ordenadas corresponden a la cantidad de veces que se ha repetido determinado valor.

Para medir un MPPC, existe una señal de *trigger* que enciende un LED y además, genera una señal de integración. Cada vez que se encienda el LED, parte de los fotones que este genera son detectados por el MPPC, el cual genera un pulso de corriente como los que se observan en la figura 2.1. Este pulso de corriente es integrado por el QDC gracias a la señal de integración. En la figura 2.1 se puede asumir que se integra todo el pulso visible. El resultado es un número entero entre 0 y 4096 que corresponde a la integración del pulso de corriente producido por el MPPC cada vez que se enciende el LED. A este suceso se le denomina un evento. Estos eventos se distribuyen según la carga que se integró y la correlación se puede apreciar también en la figura 2.1 donde el histograma aparece rotado en 90° .

Un histograma muestra cuantos eventos se produjeron por cada número entre 0 y 4096. Cada número tiene una equivalencia en carga eléctrica de $0,1[pC]$ por unidad.

Cabe destacar que en los histogramas como en el de la figura 2.2 se aprecia un *offset* (el *peak* llamado 0 pe no se encuentra centrado en cero) el cual es aportado por *offsets* en el adquisidor de datos y en parte por corrientes continuas que pueden estar presentes al momento de realizar la conversión. En los histogramas es común realizar un “corrimiento” del gráfico hacia la izquierda con el fin de posicionar el pedestal, llamado en la figura como 0 pe, en el cero del histograma.

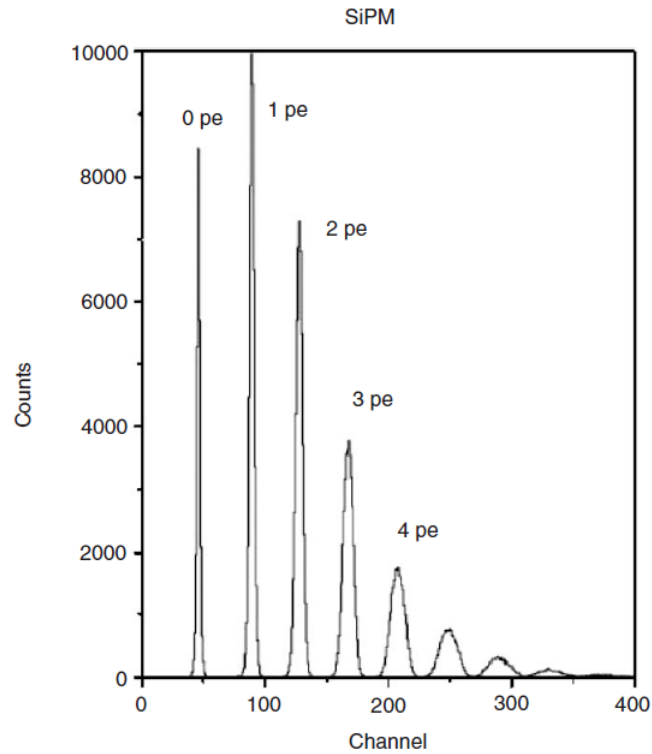


Figura 2.2: Histograma esperado idealizado.

En la figura 2.2, el primer *peak* que se observa de izquierda a derecha es el “pedestal”, y representa la integración de la señal en ausencia de avalanchas. El segundo *peak* que se observa corresponde a las integraciones de las ocurrencias de una avalancha o foto-electrón (1pe). El denominado 2pe en la figura corresponde a la integración de dos avalanchas y así sucesivamente. Debido a que los pixeles del MPPC no son exactamente iguales, se observa por cada *peak* una distribución que puede ser ajustada por medio de una campana de gauss.

2.2.1. Tensión de ruptura

La tensión de ruptura corresponde a el nivel de tensión para que el diodo comience a conducir en sentido contrario. En un MPPC no se posee sólo un diodo, si no muchos diodos, todos con resistencias

de extinción y conectados en paralelo. Por este motivo la tensión de ruptura no se puede medir tan fácilmente. Además, la tensión de ruptura varía con respecto a la temperatura.

Debido a que el fabricante provee la tensión de ruptura para cierta temperatura, se considera este valor sólo como una referencia y se realizan mediciones de ganancia para distintos niveles de tensión por sobre este valor de referencia (el fabricante provee la tensión de ruptura a 25°C y típicamente el MPPC alcanza temperaturas en la carcasa de 35 a 40°C con temperatura ambiente 25°C). Para este MPPC la dependencia de la tensión de ruptura con respecto a la temperatura es de aproximadamente $56[\text{mV}/^{\circ}\text{C}]$ según el fabricante. Por otra parte, la dependencia de la ganancia con respecto a la tensión de polarización es lineal por lo que se define a la tensión de ruptura o Breakdown Voltage como la tensión para la cual la ganancia es cero. Si suponemos que conocemos la ganancia para distintos niveles de tensión, podemos graficar la ganancia vs la tensión y realizar una regresión lineal sobre estos datos como se muestra en la figura 2.3. Con los resultados de la regresión lineal es posible extrapolar los datos y determinar para que nivel de tensión la ganancia es cero (en la figura 2.3 la tensión de ruptura es aproximadamente $72,2[\text{V}]$).

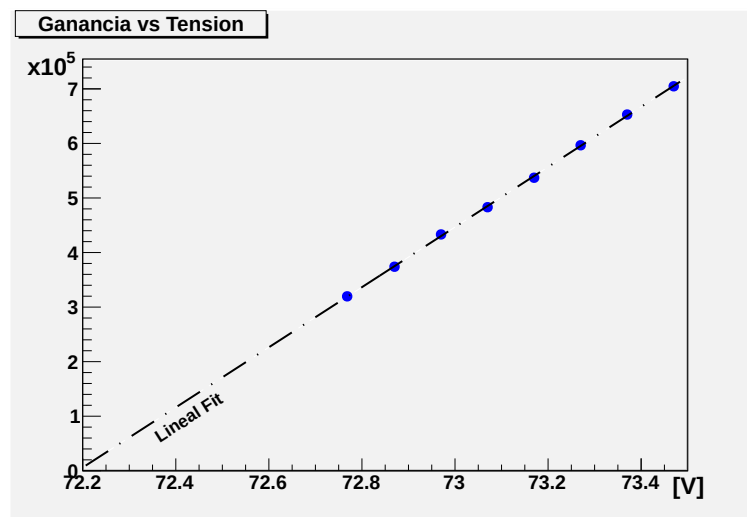
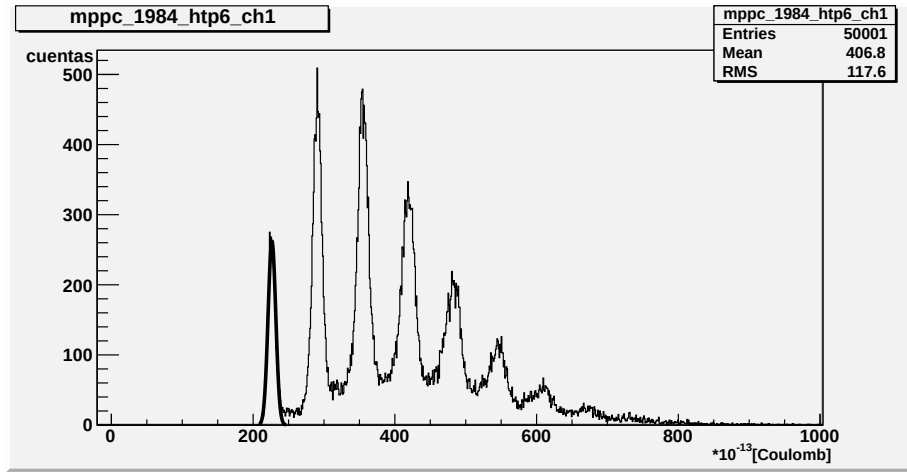


Figura 2.3: Gráfico de la ganancia versus la tensión de alimentación.

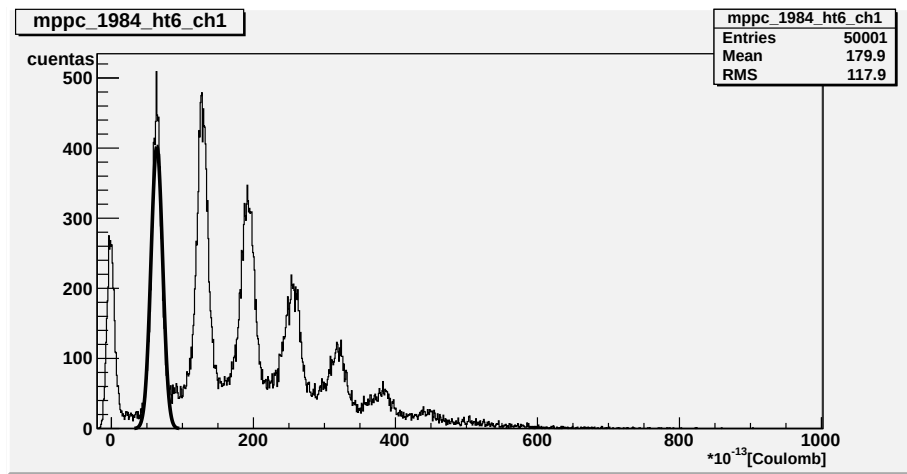
2.2.2. Ganancia

La ganancia se puede determinar fácilmente a partir de histogramas considerando la posición del primer *peak* con respecto al pedestal, ya que corresponde a la carga que entrega el MPPC cuando este detecta un sólo fotón. Como se observa en la figura 2.4a, la posición del pedestal se encuentra aproximadamente en el número 225. Se realiza un corrimiento del mismo histograma (figura 2.4b) para centrar el pedestal en cero y se observa la posición del 1er *peak* el cual se centra en 68. Esto quiere decir que el conjunto MPPC-amplificador posee una ganancia de $6,8[pC/foton]$, es decir, el MPPC posee una ganancia de:

$$\frac{6,8 * 10^{-12}}{67 * 1,6 * 10^{-19}} = 6,3 * 10^5$$



(a)



(b)

Figura 2.4: Histograma de los números entregados por el QDC.

2.2.3. Dark Noise

Se ha llamado *dark noise* a la relación existente entre los eventos en que se detectó una o más avalanchas, a pesar de existir ausencia de luz, con los eventos en que no se produjo avalancha alguna. Éstas son las llamadas cuentas oscuras y son producidas por avalanchas espontáneas. Estas avalanchas

espontáneas son producto del calor, por lo que el *dark noise* posee también una dependencia con respecto a la temperatura. Estas cuentas oscuras se pueden apreciar en la figura 2.5 en donde se observa un *peak* en la misma posición del 1er *peak* en el histograma sin luz de la figura 2.4b.

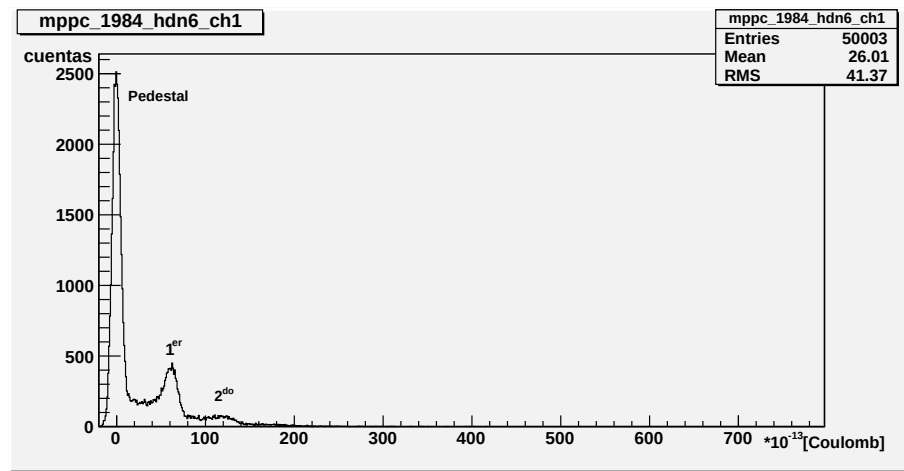


Figura 2.5: Ejemplo de histograma obtenido al realizar una medición en ausencia de luz y después de centrar el pedestal en cero.

Esto también permite darse cuenta de que al detectar una avalancha, no se puede saber si ésta fue producida por un fotón o es *dark noise*.

2.2.4. Eficiencia

Para estimar la eficiencia de detección de fotones es necesario primero conocer la cantidad de fotones incidentes en el MPPC, dado que la eficiencia de detección de fotones (PDE) es la relación entre los fotones detectados con los incidentes. Para medir la cantidad de fotones incidentes se utiliza un tubo foto multiplicador (PMT) bien calibrado y un fotodiodo (un diodo PIN). Ambos dispositivos poseen características bien conocidas, con una eficiencia de detección de fotones conocida con precisión.

El método elegido para realizar esta estimación consiste en contar con una referencia de la cantidad de luz inyectada al MPPC, como se muestra en la figura 2.6a, para esto se toma una referencia

desde el emisor de luz (por medio de un PMT), para conocer *a priori* cuanta luz emite la fuente de luz. Paralelamente se mide, utilizando un diodo PIN, la cantidad de fotones que llegaría al MPPC en cada uno de sus canales. Luego se calcula la relación entre los fotones detectados por el PMT y los fotones que llegarían al MPPC y se normalizan a un valor arbitrario, pero conocido. En la figura 2.6b se muestra un ejemplo de esta característica. Por ejemplo, si se normaliza con un valor 5, y el PMT detecta 20 fotones, quiere decir, que la tabla debe multiplicarse por 4 y se obtendrán los fotones incidentes para todos los canales. Este método se basa en que al mantenerse constante la geometría del camino que recorre la luz, la proporción entre la luz que llega al PMT y la que llega a la posición del MPPC debe mantenerse, independiente de la intensidad del emisor de luz. De esta forma, esta relación es la que debe caracterizarse cuidadosamente y normalizarse.

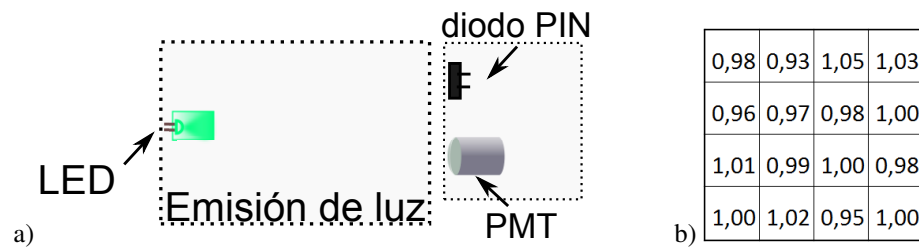


Figura 2.6: Caracterización de la luz a inyectar en cada uno de los canales del MPPC.

Finalmente se calcula el PDE para distintos niveles de tensión, se grafican y se ajustan los datos con un polinomio de segundo orden como se observa en la figura 2.7.

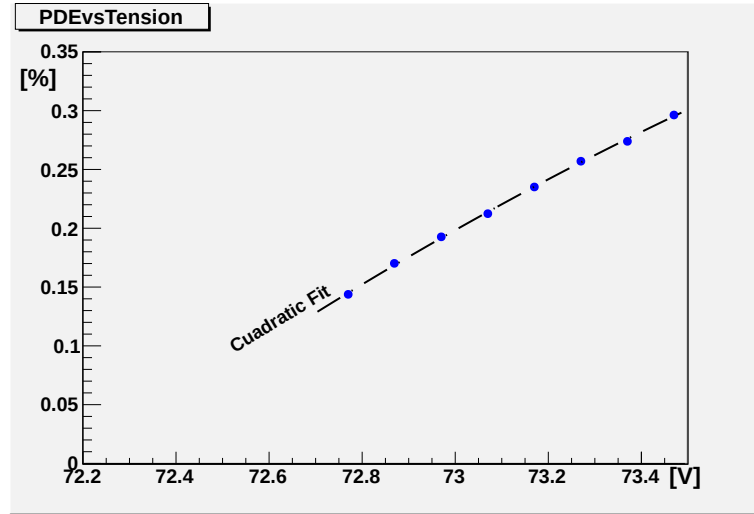


Figura 2.7: Ejemplo de la característica de PDE versus tensión obtenida.

2.3. Fotones detectados

El sistema de adquisición de datos permite medir la cantidad de fotones detectados. La estimación de fotones detectados se basa en que la distribución de eventos de cantidades de carga (histogramas) sigue una distribución de Poisson [12][13], esto quiere decir que en presencia de unos pocos fotones existe una estricta relación entre la cantidad media de fotones detectados con la cantidad de eventos en que no se detectó ningún fotón. Esto se explica de la siguiente forma.

Siendo la distribución de Poisson:

$$P(k, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

donde $P(k, \lambda)$ es la probabilidad de que ocurra k (probabilidad de detectar k fotones) dada una media de ocurrencia de λ (una media de fotones λ). Si se conoce la cantidad de eventos con cero fotones detectados, se deduce:

$$P(0, \lambda) = e^{-\lambda} \Rightarrow \lambda = -\ln(P(0, \lambda)) \quad (2.1)$$

donde λ corresponde a la cantidad media de fotones detectados. Esta primera aproximación no considera el efecto del *dark noise*, pero para 1 o 2 fotones se ha encontrado que al corregir $P(0, \lambda)$ con la probabilidad de *dark noise* la aproximación es confiable.

2.4. Metodología del trabajo

Para lograr determinar todas las características se sigue un orden lógico. Debido a que el fabricante proporciona un nivel de tensión recomendado (V_{rec}) para cada MPPC, este es útil como base. Lo primero es realizar mediciones (véase la sección 3.6) en ausencia de luz y con luz, realizando un barrido para distintos niveles de tensión. En particular debido a la temperatura típica de operación en el laboratorio, el barrido se realiza desde $V_{rec} - 0,1[V]$ hasta $V_{rec} + 0,6[V]$.

A partir de los histogramas generados de las mediciones con luz, es posible conocer la ganancia para cada celda del MPPC y para cada tensión aplicada. Con esto es posible determinar exactamente la tensión de ruptura para cada celda a la temperatura que se trabaja (es importante contar con un equipo suficientemente rápido para que la medición completa tarde no más de media hora para evitar cambios significativos en la temperatura). Además a partir de las mediciones sin luz se puede conocer el *dark noise* para cada tensión y cada celda.

Finalmente, conociendo la caracterización y conociendo la amplitud de la señal en el PMT, se infiere la cantidad de fotones incidentes en cada celda del MPPC. También es posible conocer la cantidad de fotones detectados a partir del histograma con lo que se determina así la eficiencia de detección de fotones PDE.

Capítulo 3

Diseño y construcción del setup experimental

3.1. Descripción general

Una instalación de medición o un *setup* experimental corresponde al equipo físico utilizado para realizar las pruebas. Este consta de una caja negra que aísla de la luz externa y además contiene los elementos necesarios para realizar las mediciones. Dentro se debe encontrar el LED que genera la luz, el divisor de luz, el PMT de referencia, el MPPC con su amplificación correspondiente y algunos sensores. También debe permitir la conexión cuando corresponda con elementos externo, como son la fuente de alimentación de la electrónica, las fuentes de alta tensión y el adquisidor de datos. En este capítulo se describe la construcción de la caja, sus componentes internos como también su conexión con los elementos externos, incluyendo la automatización del proceso de medición.

3.2. Caja negra

Como se mencionó anteriormente, para realizar la medición de un MPPC se requiere de una caja completamente oscura, la cual debe poseer las características que se listan a continuación:

- 3 secciones selladas, una para la generación, otra para la división y otra para la recepción de la luz en donde también se aloja la electrónica de polarización.
- Deben haber conectores en la parte de generación de luz para alimentar el LED y conectores en la parte de recepción, tanto para la polarización de la electrónica, la polarización del MPPC y el PMT además de conectores para los cables de señal.
- Debe estar completamente sellada e impedir el ingreso de la luz exterior.
- Debe tener una tapa que permita un fácil acceso al cambio de MPPC.
- Debe permitir una fijación de modo que al colocar los MPPCs, estos siempre queden en la misma posición.

En la figura 3.1 se ilustran los requerimientos mínimos y distribución espacial de los elementos.

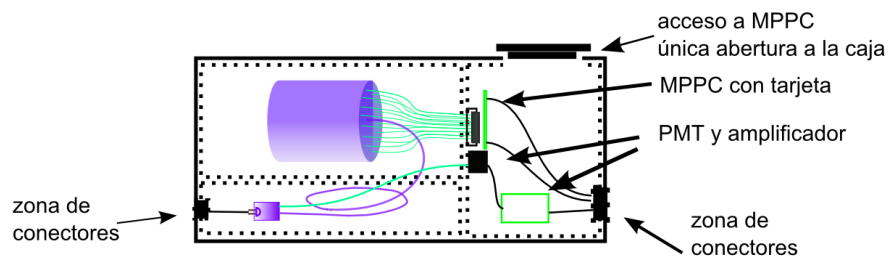
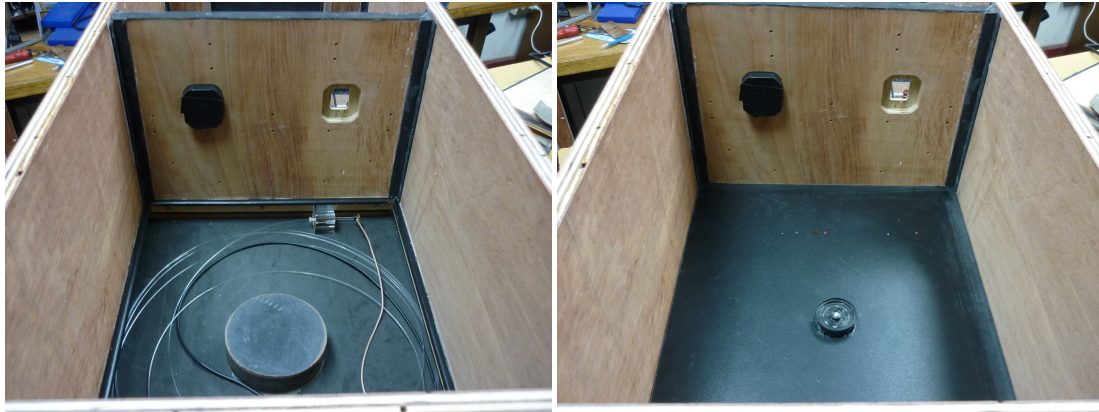


Figura 3.1: Caja oscura con todos sus elementos.



(a) Caja oscura sin separación.

(b) Caja oscura con separación.

Figura 3.2: Mitad de la caja oscura, corresponde a la parte izquierda en la figura 3.1.

Lo anteriormente listado corresponden a los requisitos mínimos para la caja oscura, adicionalmente durante su construcción se agregaron algunas características para un mejor funcionamiento.

- Se agrega una ventana en la sección frontal de la caja, en caso de requerir acceso a esta sección (figura 3.3a).
- Se agregan más conectores en la sección de generación de luz, para realizar medición adicional de luz, y conectores de polarización en caso de incluir más elementos en esta sección (figura 3.3b).
- Se agrega un diodo PIN en la sección de generación de luz para monitorear la luz que emite el LED (figura 3.4a y 3.4b).
- Se agrega un seguro de puerta abierta, para desactivar la fuente de alta tensión en caso que se abra la tapa mientras ésta aún se encuentra encendida (figura 3.4c).
- Se generan zócalos en una pared interna de la caja para de esta forma fijar el MPPC siempre en la misma posición por un lado y de las fibras por el otro.

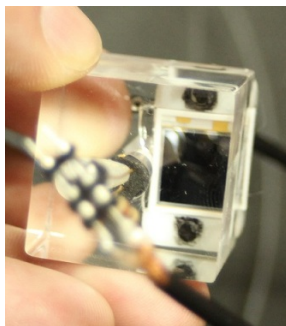


(a) Conectores frontales de la caja oscura.

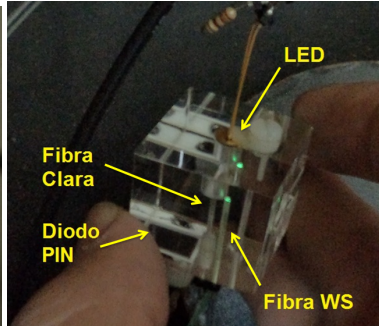


(b) Conectores posteriores de la caja oscura.

Figura 3.3: Conectores de la caja oscura. a) Conectores frontales: de izquierda a derecha se encuentran los conectores de alta tensión de PMT (830[V]) y de MPPC (70[V]), señal del PMT, sensor de temperatura, 16 conectores tipo LEMO de los canales de medición del MPPC y polarización ($\pm 5[V]$). b) Conectores posteriores: conectores de polarización y de señal adicionales.



(a) Diodo PIN.



(b) Elementos conectados al LED.



(c) Sensor de puerta abierta instalado en la tapa de la caja

Figura 3.4: Componentes instalados.

Las dimensiones consideradas permiten acomodar los elementos necesarios dentro de la caja oscura y se basan principalmente en estimaciones. La única medida mínima viene dada por la fibra clara

para el retardo de luz, la cual no debe tener un diámetro inferior a 25[cm] al enrollarla. Esto para evitar daños en ella además de evitar que la luz escape de la fibra. En la figura 3.2 se muestra la sección de generación y división de la luz. Se observa como están separadas estas secciones por un piso separador.

3.3. Fibra de centelleo

Para el experimento es requerido que la eficiencia de detección de fotones sea medida para un espectro conocido de luz, que es provisto por una fibra *Wavelength Shifting* (fibra WS). Esta fibra posee ese nombre debido a la característica señalada en la figura 3.5a. En este experimento se ha utilizado la fibra Y11(200) producida por Kuraray Company [14]. Esta fibra está compuesta por dos partes, un núcleo y un recubrimiento de distintos índices de refracción tal como se muestra en la figura 3.5b. Esto permite transportar la luz dentro de ésta al igual que en una fibra de vidrio. La combinación de los distintos índices de refracción de los materiales permite trasportar la luz que se encuentre dentro de los conos señalados en la figura 3.5c.

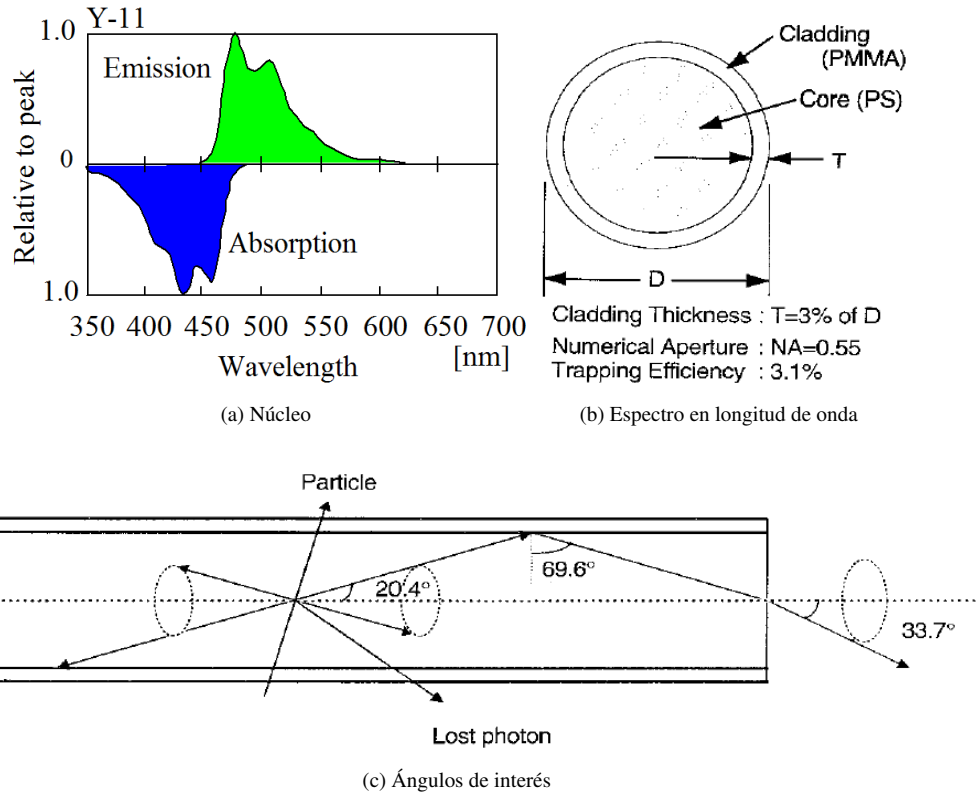
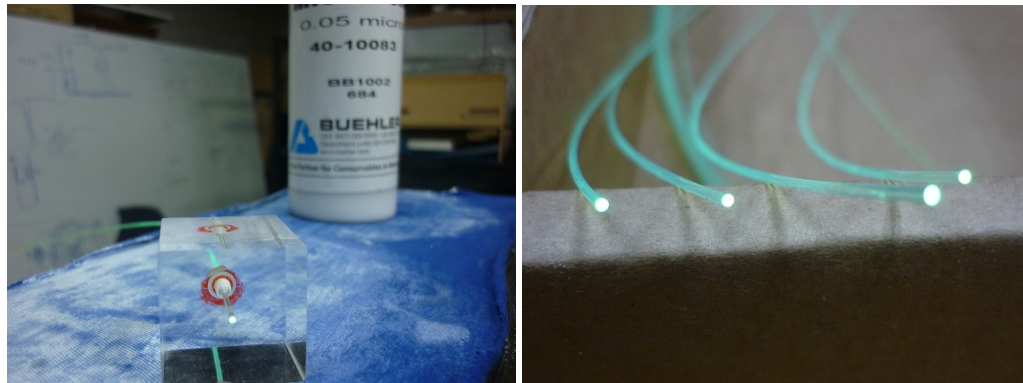


Figura 3.5: Sección transversal y longitudinal de la fibra WS, y espectro de absorción y emisión.

La fibra Kuraray Y11 es capaz de emitir el espectro de luz que se indica en la figura 3.5a. Una fibra WS es capaz de absorber fotones dentro de un determinado espectro y liberar fotones que se encuentran en el espectro menor energía (i.e. de mayor longitud de onda como se ilustra en la figura 3.5a). La fibra WS también es capaz de generar fotones debido a la ionización producida por una partícula de alta energía (como se indica en la figura 3.5c), pero esta propiedad no es de interés para este experimento ya que las partículas que pueden generar fotones mediante este efecto son muones que podrían atravesar la fibra con una tasa muy baja, menor a $1[Hz]$. Para el correcto funcionamiento de la fibra en este experimento, es necesario introducir en ésta, luz entre azul y violeta, más específicamente dentro de las longitudes de onda $400[nm]$ y $450[nm]$. Para esto se ha utilizado un LED de $415[nm]$ que se logró encender con un pulso de tan sólo $5[ns]$ y aproximadamente $5[V]$. También se intentó con un LED de $405[nm]$, pero sólo fué posible encenderlo con $8[V]$, muy cercano al límite de $10[V]$ del generador de señales con

el que se cuenta, por lo que se descartó.

Un punto importante en el uso de este tipo de fibras es el corte del extremo por donde saldrá la luz. Este corte debe ser de buena calidad para permitir que la luz salga de la fibra sin problemas. Al intentar cortar la fibra utilizando un cuchillo estándar para cartón, este produce un corte hasta la mitad de la fibra y luego la fibra se quiebra en la misma dirección por lo que a simple vista pareciera que el corte es bueno sin embargo, al mirar bajo un microscopio o lupa de alta amplificación, puede notarse que el corte no es limpio. Luego de indagar con distintos filos y técnicas, se llegó a la conclusión de que la mejor opción es pulir la sección transversal de la fibra luego de cortarla. Para pulir la fibra, ésta se introdujo en una pieza plástica para asegurar un pulido perpendicular. Para el proceso de pulido se utilizaron dos abrasivos, primero uno de 3 micrones y luego uno de 0.05 micrones. Este último abrasivo y la pieza plástica se observan en la figura 3.6a. El resultado del pulido se observa en la figura 3.6b.



(a) Fibra WS en soporte de pulido.

(b) Fotografía de la fibra WS pulida.

Figura 3.6: Fotografía de la pieza utilizada para pulir junto al liquido de pulido utilizado para el acabado.

3.4. Generación y divisor de luz

Con sólo un único LED se debe introducir luz a los 16 canales del MPPC por medio de las fibras WS, para esto se optó por un modelo simple de división de luz de forma homogénea. Este consta de un cilindro de acrílico de alto porcentaje de transparencia (cercana al 95 %). Por una cara del cilindro se

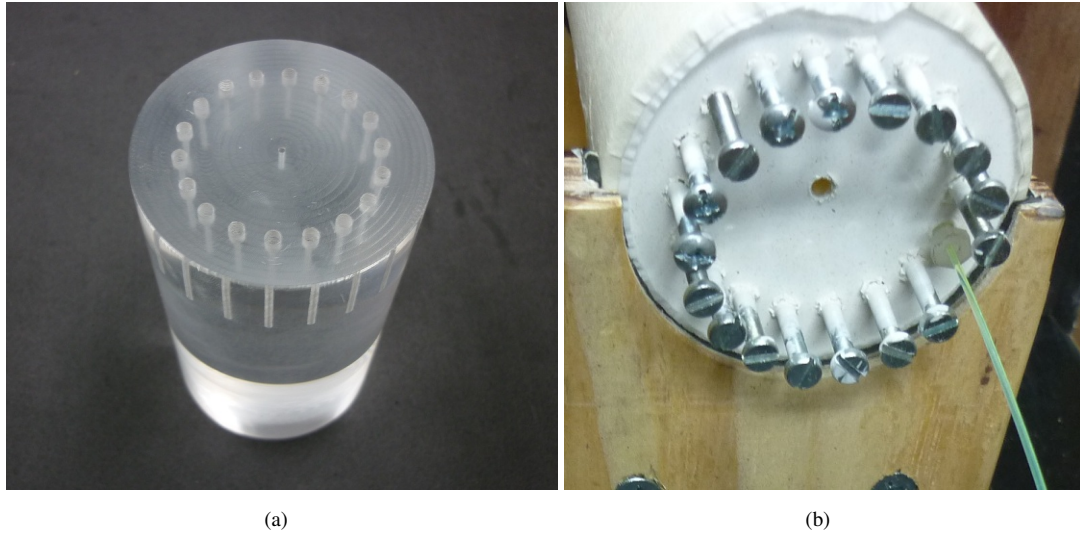


Figura 3.7: Divisor de luz utilizado. Posee 18 agujeros equidistantes del centro para poder realizar pruebas. a) Divisor recién mecanizado. b) divisor ya pintado y comenzando la instalación de las fibras WS.

introduce la luz de $415[nm]$ en el centro, ésta rebota de forma homogénea en la cara opuesta y en todas direcciones, en la misma cara que se introduce la luz, se introducen las fibra WS de forma que todas se encuentren equidistantes del centro. El diseño del cilindro se muestra en la figura 3.7a

La luz producida por un LED de $415[nm]$ es transmitida por una fibra transparente de largo $5[m]$ hasta el centro del divisor de luz. Equidistantes del centro se conectan 16 fibras WS de $30[cm]$ de largo que colectan luz violeta y emiten más o menos la misma cantidad de fotones alrededor de $520[nm]$, cada una de las cuales termina en frente de un canal del MPPC.

Las fibras WS son sostenidas con la ayuda de tornillos plásticos (figura 3.7b) a los cuales se les ha perforado un agujero por el cual insertar la fibra. En primera instancia las fibras sólo son introducidas y apretadas levemente con el tornillo plástico, sin ninguna clase de pegamento o grasa óptica. Debido a que la luz colectada por cada fibra es suficiente, no es necesario introducir las fibras con grasa óptica o pegamento óptico para mejorar la unión.

Para que la luz no escape del cilindro de acrílico, este es pintado por una pintura blanca por sus caras y manto. La elección de la pintura no es trivial ya que una mala elección puede resultar en un

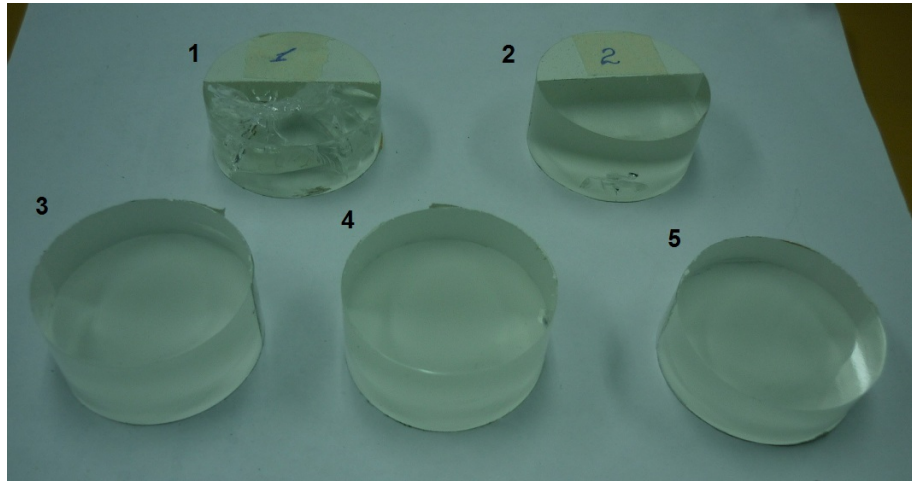


Figura 3.8: Pruebas de pintura utilizadas para pintar el cilindro. 1) esmalte sintético en spray. 2) tempera. 3) esmalte sintético líquido. 4) Oleo. 5) pintura ARTEL (pintura utilizada para pintar el divisor de luz.)

divisor de luz quebrado como se observa en la figura 3.8.

3.5. Entrega de fotones al MPPC

Como se menciona en la sección anterior los fotones se entregan al MPPC por medio de 16 fibras WS, si asumimos que la cantidad de fotones inyectada a cada una de las fibras es similar, también se debe asegurar que la entrega de estos se realice bajo las mismas condiciones para los 16 canales del MPPC. Es por esto que se ha diseñado una pieza plástica que asegura que cada fibra se posicione justo en el centro de cada canal como se muestra en la figura 3.9. Además, la distancia de las fibras hasta el MPPC no debe variar entre canales ni de un MPPC a otro. Para mantener todas las fibras en una misma posición se construyó la pieza de la figura 3.9a. Con el fin de proveer una entrega de luz eficiente por parte de la fibra, el extremo de cada una de éstas debe ser pulido. El resultado después de pulir la pieza de la figura 3.9a se observa en la figura 3.9b. Esta pieza es ajustada en la pared interior como se observa en la figura 3.9c.

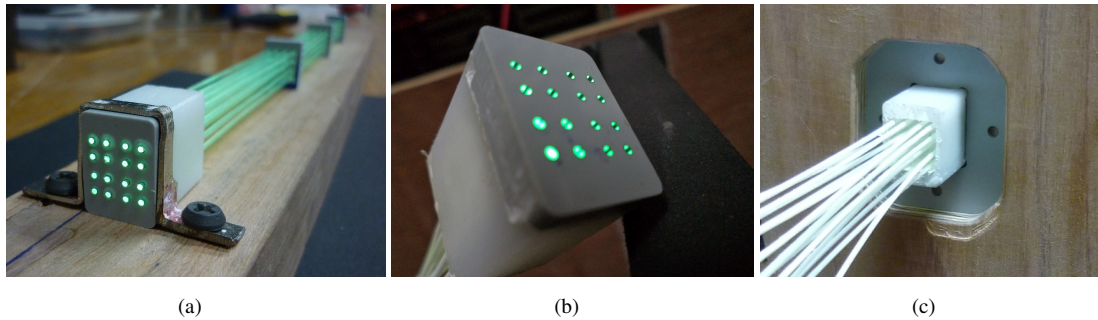
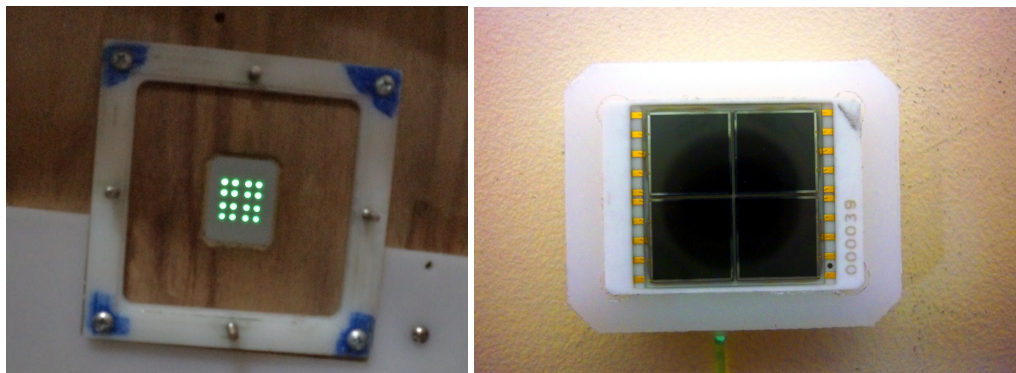


Figura 3.9: a) Pieza plástica diseñada para fijar la fibra WS. b) Fibras WS pulidas. c) Pieza plastica instalada.

En la figura 3.10a se observa la pieza por el lado del MPPC, en donde se entregan los fotones. Se muestra la fotografía con la caja abierta sólo para hacer notar por donde salen los fotones, por lo que la fibra captura la luz ambiente y produce el centelleo verde. En esta pieza se ha mecanizado un espacio que permite calzar el MPPC cuando este está inserto en una pieza plástica que ajusta la posición, evita el roce del detector con la madera para evitar que se dañe y permite una mejor manipulación (figura 3.10b).



(a) Espacio en la pared para ajustar el MPPC dentro de la pieza plastica. (b) MPPC con pieza plástica diseñada para un manejo seguro.

Figura 3.10: Piezas para afirmar el MPPC a medir.

Finalmente se observa en la figura 3.11 el conjunto completo, de división y entrega de fotones en

sus posiciones finales. Se observa también la fibra clara que sale de la sección de generación de luz y que entra en el divisor de luz. Además de la sección de generación de luz sale una fibra WS directamente al PMT. Del divisor de luz se observan las 16 fibras WS que terminan en la pared interna.



Figura 3.11: Entrega de fotones al MPPC y al PMT.

3.6. Electrónica y equipos utilizados

Para el funcionamiento del PMT y del MPPC, es necesario polarizar estos dispositivos con ciertos niveles de tensión. El PMT requiere de una polarización de alrededor de $800[V]$ la cual se divide entre los dynodos de este por medio de divisores de tensión resistivos como se indica en la figura 3.12. Debido

a la simplicidad del diseño, este se diseñó y desarrolló como parte del trabajo, en la figura 3.13 se ilustra el muestra de la PCB.

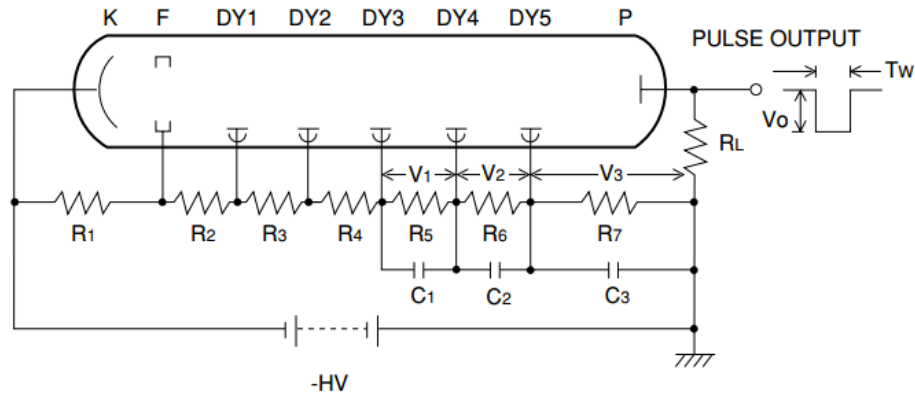


Figura 3.12: Polarización del PMT.

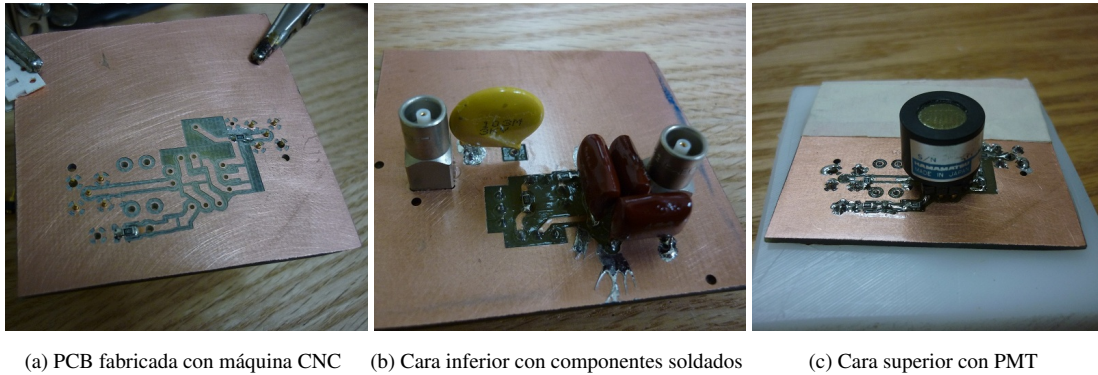


Figura 3.13: Desarrollo de PCB para polarización de PMT.

En el caso de la polarización del MPPC, ésta consiste sólo en conectarlo a la tensión de operación con una resistencia típicamente de $10[k\Omega]$ y una resistencia de $510[\Omega]$ a tierra. Debido a que las señales provenientes tanto del PMT como del MPPC no poseen una amplitud suficiente para que sean correctamente detectadas por el adquisidor de datos, es necesario adaptar estas señales, para ello en el caso del PMT se conecta un amplificador. En el caso del MPPC, tanto la polarización como la amplificación es provista por una sola tarjeta entregada por Jefferson Laboratories, se determinó que la ganancia de esta

tarjeta es de 67.

Los equipos utilizados se listan a continuación con una breve explicación sobre su utilización:

- 1 **Fuente de poder estándar:** Se utiliza para polarizar las tarjetas de amplificación, además se utiliza para activar la señal de *kill* que apaga la fuente de alta tensión en caso que se abra la tapa de la caja.
- 2 **CAEN High Voltage Power Supply:** Fuente de alta tensión de $5[mA]$, utilizada para polarizar el PMT, permite mediante una señal de *kill* disminuir rápidamente la tensión a $0[V]$ en caso de emergencia.
- 3 **Arduino:** Microcontrolador con conexión USB. Utilizado para tomar mediciones de temperatura dentro de la caja utilizando una termoresistencia calibrada.
- 4 **Pulse Pattern Generator Keithley 3402:** Generador de patrones de pulsos de dos canales completamente controlable vía USB. Permite la generación de pulsos de disparo del LED de $5[ns]$ de ancho de pulso y tensión de hasta $10[V]$. Además genera una señal de *trigger* que sincroniza la generación de pulsos con la adquisición de datos.
- 5 **Source Meter Keithley 2402:** Fuente de tensión o corriente con medición de ambas. Permite fijar tensiones de hasta $100[V]$ con precisión de $10[mV]$, además permite configurar limitaciones de corriente máxima, además es completamente controlable vía puerto GPIB (se utiliza un adaptador GPIB/USB). Este equipo es utilizado para polarizar el MPPC debido a la precisión que ofrece y a la capacidad de limitar por corriente, lo que permite evitar daños al MPPC en caso de algún error al fijar la tensión.
- 6 **Adquisidor de datos V792 QDC:** Equipo de norma VME, es un adquisidor de datos que integra pulsos de corriente durante un tiempo de duración igual a un pulso de control denominado GATE que es ingresado de forma analógica. El resultado de la integración es almacenado como un entero de 14 bits. Permite medir la carga equivalente de un pulso de corriente que puede provenir tanto de un PMT como de un MPPC.

Cabe hacer la aclaración que para el proceso de calibración y sincronización de las señales se utilizó un Osciloscopio LeCroy Waverunner de $1GHz$ de ancho de banda y $10GS/s$.

3.7. Conexión de los equipos y puesta en marcha

En la figura 3.14 se observa la conexión de la caja negra con todos los equipos mencionados anteriormente, a excepción de la fuente de poder de los amplificadores. En la figura el computador representa en la realidad dos computadores, uno bajo entorno Windows, el que permite controlar el *Pulse generator* vía USB, el *Source Meter* vía USB con una interfaz USB/GPIB y un Arduidno vía USB. Esta conexión se realizó ya que no fué posible controlar los dos primero equipos en Linux. Un computador con linux es el que se conecta vía *sockets* al primer computador para controlar finalmente estos equipos. Además, el computador con linux se conecta directamente con el QDC vía USB. Los retardos por conexión no significan ningún problema en este esquema de conexión de estos equipos, dadas las funciones que realizan.

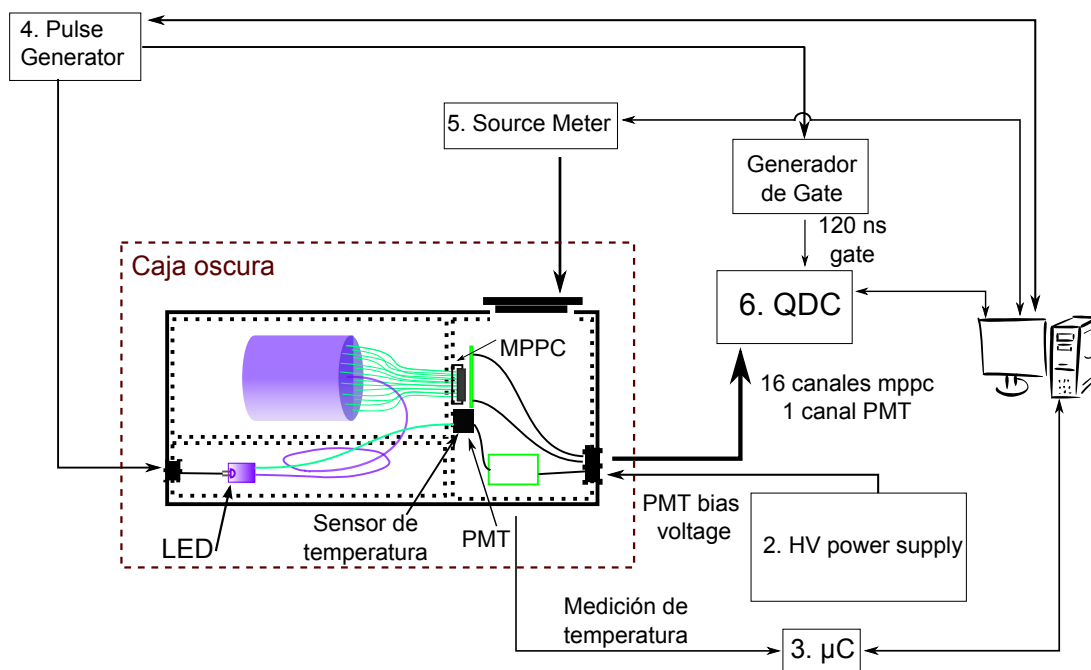


Figura 3.14: Esquema de conexiones del *setup*.

Debido a que los tiempos de las señales son del orden de los nano segundos, el retardo producido por el largo de los cables es comparable con la duración de las señales, por lo que se utilizó un osci-

loscope para coordinar todas las señales correctamente en la adquisición de datos. Principalmente se debe ajustar que los pulsos provenientes tanto del PMT como del MPPC estén retrasados aproximadamente $20[ns]$ con respecto de la señal GATE que utiliza el QDC para realizar la conversión debido a que requiere un tiempo de configuración durante el cual es posible que el QDC no integre la señal.

Para proteger los equipos contra cortes de tensión eléctrica, se protegieron todos los equipos conectándolos a través de UPS. Se comprobó también, utilizando el osciloscopio, que la conexión mediante UPS no produjera cambios ni introdujera ruido electromagnético.

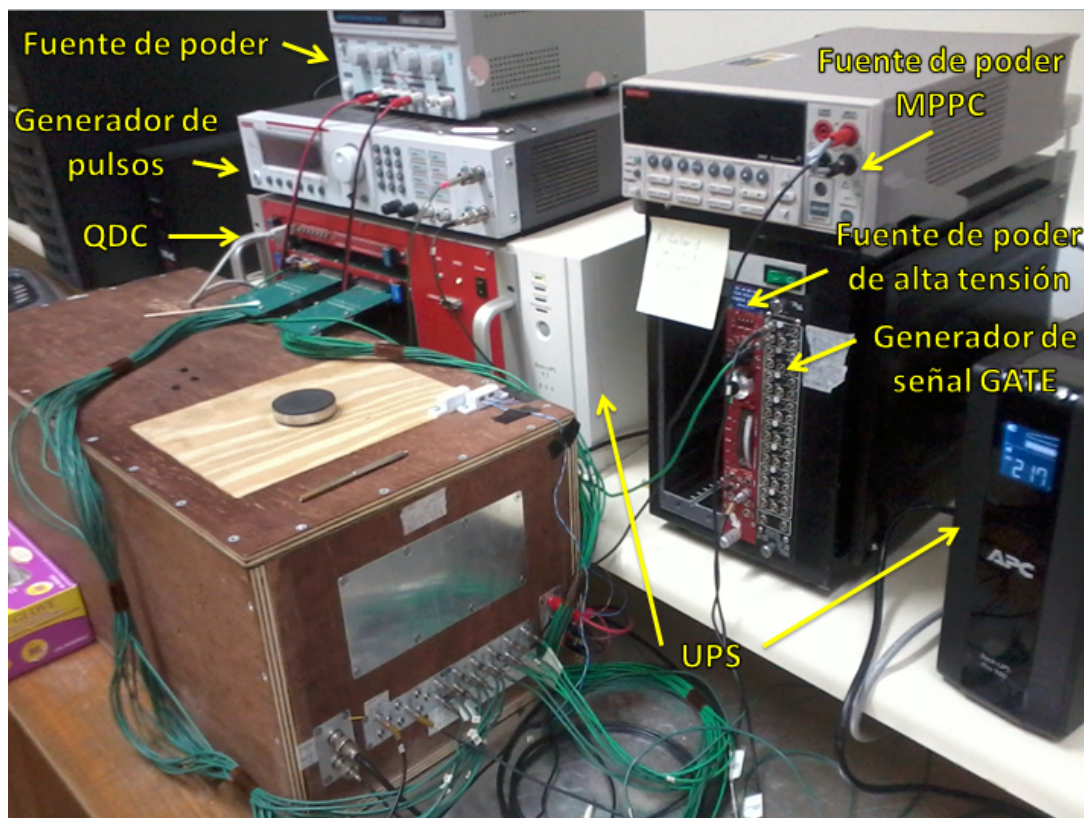
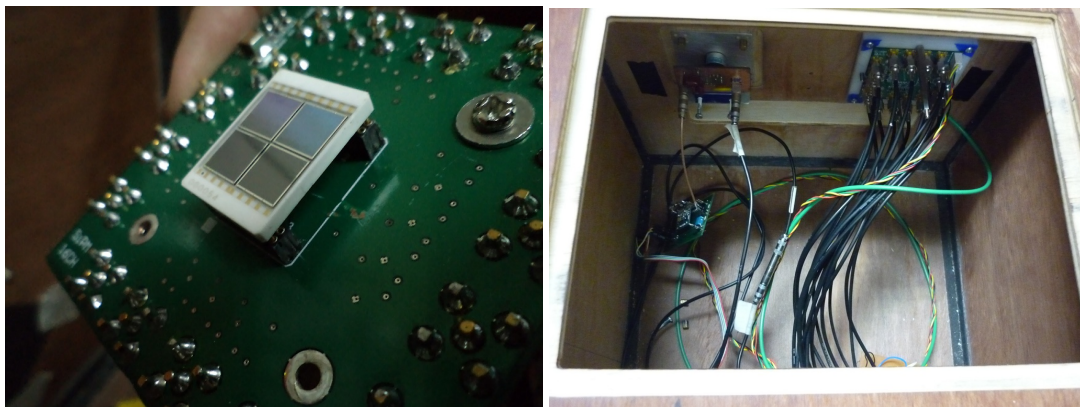


Figura 3.15: *Setup* construido.

3.8. Realización de una medición

Se entiende por realización de una medición a la ejecución del script de medición que controla todos los parámetros y realiza la adquisición de datos luego de conectar el MPPC de forma correcta. El script utilizado fué programado en bash y se puede encontrar en el anexo B y C.



(a) MPPC correctamente conectado a la tarjeta polarizadora.

(b) Tarjeta polarizadora en su posición de medición

Figura 3.16: Conexión del MPPC para su posterior medición.

Lo primero es fijarse antes de abrir la caja que la fuente de alta tensión este apagada para cuidar que el PMT no se sature con un exceso de luz (en la tapa de la caja se ha instalado un seguro que apaga automáticamente la fuente de alta tensión, pero aún así es posible producir daños). Luego de abrir la caja, se extrae el MPPC anterior de haber uno conectado. Luego se debe conectar el MPPC en la tarjeta polarizadora cuidando que el número identificador de este quede en la parte inferior, luego esta tarjeta se introduce en un espacio especialmente diseñado para que la posición sea siempre la misma y la calibración realizada con anterioridad sea efectiva. Luego se cierra la caja, se enciende la fuente de alta tensión y se ejecuta un programa para corroborar que la conexión se realizó correctamente, además de testear la conexión con los equipos y la fuente de alta tensión. De resultar exitosa la prueba anterior se puede proceder a medir el MPPC. El programa de prueba arroja por pantalla avisos si algo no funciona correctamente, dando indicios de cual podría ser el problema.

Para medir el MPPC se debe ejecutar el programa automatizado de medición. Este programa

recibe como único parámetro el número identificador del MPPC y este se encarga de crear los directorios necesarios y realizar todo el proceso de medición. Al final de la medición se tendrá un archivo de texto con 17 columnas y tantas líneas como *triggers* se hayan producido.

Es decir, el computador controla la tensión de polarización del MPPC por medio del Source Meter, luego de polarizar, se requiere de un tiempo aproximado de 5[*min*] para que la corriente a través de este se estabilice. Luego el computador controla el generador de pulsos para que genere *trigger* por un canal y teniendo la opción de encender o no encender el LED.

Por cada *trigger* generado, se genera una señal de GATE que llega al QDC, el cual integra todas las entradas el tiempo que dure la señal de GATE. El resultado de esta integración es almacenado como un número de 14 bits para cada canal de entrada en un buffer interno del QDC, el programa que captura los datos, recupera estos y los almacena en un archivo de texto. De esta forma, por cada *trigger*, se generan 17 números que son concatenados como una fila en un archivo de texto.

3.9. Automatización del proceso

La automatización del proceso de medición es un proceso necesario, ya que el objetivo es la caracterización de más de 1000 unidades de MPPC. Además debido al procedimiento de medición, cada MPPC requiere de 16 mediciones bajo distintos parámetros y debe ser realizado por un personal capacitado que tras algunas horas de operar la estación podría eventualmente cometer errores que podrían incluso dañar la estación de medición. La idea es minimizar la intervención humana en el proceso para evitar este tipo de errores.

Al finalizar la automatización basta con correr un sólo script, programado en bash, el cual; busca en una base de datos la tensión de polarización del MPPC en cuestión, genera los directorios con los nombres pertinentes, controla la tensión provista por el *Source Meter* el cual polariza el MPPC. Luego el programa espera por 5[*min*], realiza medición sin luz para la cual controla el generador de pulsos para que genere *trigger* por un canal y encendiendo el LED de manera que los pulsos producidos por este queden fuera de la señal de GATE. Luego se realiza medición con luz encendiendo el LED de manera que los pulsos generados se produzcan dentro de la ventana del GATE. Estas mediciones se repiten aumentando

la tensión del MPPC en $0,1[V]$ y esperando $1[min]$ a estabilizar nuevamente la corriente para realizar una nueva medición sin luz y luego con luz y así sucesivamente hasta completar mediciones para 8 tensiones distintas. Este programa almacena automáticamente los archivos en un servidor con nombres apropiados y en las carpetas apropiadas. El proceso de medición se explica en el diagrama de flujos de la figura 3.17.

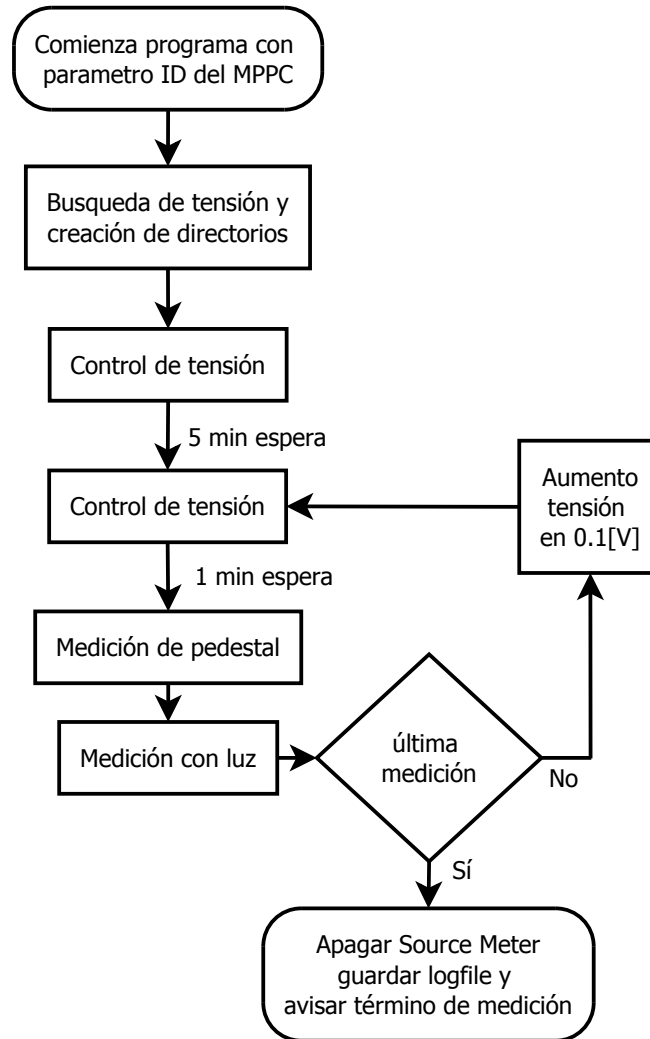


Figura 3.17: Diagrama de flujos de la medición del MPPC.

Capítulo 4

Resultados experimentales

4.1. Calibración

El proceso de calibración es crucial y muy sensible. Es por esto que una vez realizada la operación no se debe mover ninguna de las partes internas de la estación, y en lo posible no mover la estación. Como se mencionó anteriormente, el proceso de calibración se realiza utilizando un diodo PIN en conjunto con un PMT debido a que son dispositivos con características bien conocidas. Como se explicó en la sección 2.2.4 se desea obtener una relación entre el número de fotones que incidirían en el MPPC con respecto a una determinada amplitud de señal en el PMT. Para conocer el número de fotones que incidirían en el MPPC es que se utiliza el diodo PIN ya que tiene una eficiencia bien definida, la cual es definida por el fabricante como fotosensibilidad (photo sensitivity) y se expresa en $[A/W]$. En este sentido, la fotosensibilidad es la relación entre la corriente generada en el diodo PIN con respecto a la potencia de la luz incidente. Este diodo es posicionado en frente de un orificio previamente seleccionado, como se observa en la figura 4.1, de modo que sólo los fotones de un canal sean sensados por el diodo PIN. Si consideramos la luz producida por la fibra WS con una longitud de onda media de $\lambda = 520[nm]$, se obtiene del *datasheet* que la foto-sensibilidad es $0,27[A/W]$.

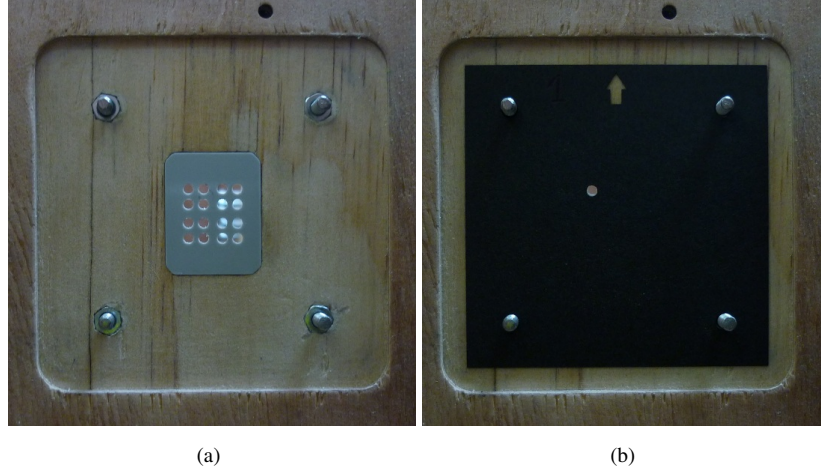


Figura 4.1: Medición de un sólo canal. Se observa que el cartón negro sólo deja descubierto un orificio por donde saldrán fotones que corresponde al primero de arriba a la izquierda.

Para utilizar el dato de la fotosensibilidad, se debe conocer la potencia de la luz incidente, es decir la energía aportada por todos los fotones que inciden en un segundo. Es conocido que la energía aportada por un fotón es:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

donde, $h = 6,626 * 10^{-32} [J * s]$, $c = 3 * 10^8 [m/s]$. Si consideramos λ como la media del espectro obtenido por la fibra WS, es decir, $\lambda = 520 [nm]$, se obtiene que en promedio la energía de un fotón es de $3,75 * 10^{-17} [J]$. Esto quiere decir que si el diodo PIN recibe sólo un fotón en un segundo, este produciría una corriente de:

$$3,75 * 10^{-17} * 0,27 [A] = 1,01 * 10^{-17} [A]$$

Esta corriente por si sola es indetectable, pero al generarse alrededor de 100 fotones por cada vez que se enciende el LED y encender este a una frecuencia de $1 MHz$, el diodo PIN genera una corriente de $1,01 * 10^{-9} [A] = 1,01 [nA]$. Esta corriente sigue siendo una corriente muy baja, pero si es medible por un equipo sensible como lo es el *Source Meter* utilizado.

Por otra parte se mide la carga generada por el PMT utilizando el QDC, para tener una referencia.

Cabe destacar que esta medición se realiza a 10KHz debido a limitaciones en la velocidad de adquisición de datos del QDC y que la cantidad de fotones generados por cada vez que se enciende el LED, es completamente independiente de la frecuencia con que se encienda.

Con ambos datos, la corriente en el diodo PIN y la carga generada por el PMT, se obtiene una relación entre la corriente generada en el diodo PIN por cada vez que se enciende el LED, es decir, el número de fotones detectados por el diodo PIN y el número de fotones detectados por el PMT. Se espera que esta relación no varíe al cambiar la cantidad de fotones producidos, ya que se confía en la alta linealidad tanto del diodo PIN como del PMT. De esta forma se puede lograr una normalización de la cantidad de fotones que llega a cada canal del MPPC con respecto a la cantidad de fotones detectada por el PMT. De ahora en adelante sólo basta calcular la cantidad de fotones detectados en el PMT para conocer inmediatamente la cantidad de fotones que entregan cada una de las 16 fibras WS al MPPC. Por otra parte, la cantidad de fotones detectada por el PMT se mide considerando tanto la media como la desviación estándar medidos en un histograma, considerando mediciones con luz y sin luz, así el número de fotones detectados por el PMT se define como:

$$N_{\text{fotones}} = \frac{(Mean_{\text{conLuz}} - Mean_{\text{sinLuz}})^2}{RMS_{\text{conLuz}}^2 - RMS_{\text{sinLuz}}^2}$$

Esta relación se obtiene al considerar que la distribución observable en histogramas de carga del PMT, corresponde a una distribución de Poisson. Dado que el histograma se expresa en unidades de QDC, no se conoce cuantas unidades de QDC corresponden a la carga producida por detectar un foton. Es decir,

$$Mean_{\text{histograma}} = g * \lambda$$

$$RMS_{\text{histograma}} = g * \sqrt{\lambda}$$

donde g es una ganancia desconocida y λ es la media en término de fotones. Entonces para obtener λ , se utiliza,

$$\lambda = \frac{Mean^2}{RMS^2}$$

Además, se debe substraer el efecto del pedestal, tanto en magnitud como en dispersión. Cabe aclarar que esta estimación no es muy precisa, pero si estable, y eso es lo que se requiere de esta medición.

4.2. Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos se realizó utilizando una herramienta especial de estadísticas llamada ROOT [15], creada por la Organización Europea para Investigación Nuclear CERN. Esta herramienta posee su propio entorno de programación, pero también posee una API para ser utilizada como librería de C++.

Como se mencionó anteriormente, los datos provenientes del adquisidor de datos son guardados en archivos de texto en un servidor. En estos archivos en cada columna se encuentran datos de canales distintos y por cada fila se encuentra un evento distinto o resultado de conversión del QDC producto de una señal GATE detectada. En el apéndice A se muestra la cabecera de uno de los archivos almacenados en el servidor.

La conversión que realiza el adquisidor de datos es el resultado de la integración del pulso producido por el MPPC durante la ventana de tiempo definida por el pulso de GATE. En la figura 4.2 se observan ambas señales. Se observa también gracias a la persistencia de la señal, una suerte de distribución que marca claramente al menos 4 líneas. La primera línea corresponde al pedestal, es decir, es la señal que se obtiene cuando no se ha producido ninguna avalancha. Luego se observa la señal cuando se produce una avalancha y así sucesivamente mientras más avalanchas producidas en el mismo instante más grande es la señal, por tanto el resultado de la integración también será mayor. En la figura 4.3 provista por el fabricante se puede apreciar claramente la correlación entre los pulsos y el histograma respectivo.

Tanto a la figura 4.2 como en la figura 4.3 se observan algunos *peaks* producidos fuera de la señal de GATE de forma aleatoria, estos son las cuentas oscuras o *dark noise* que puede ocurrir en cualquier instante, incluso en el mismo instante en que se detectaron fotones. Es por esto que anteriormente se habla de avalanchas producidas y no de fotones detectados, ya que no es posible saber con certeza si una avalancha es producto de fotones incidentes o *dark noise*.

El adquisidor de datos realiza la conversión por cada señal de GATE utilizando esta misma señal como ventana de integración y guarda, o más bien concatena, una línea con el resultado de cada integración en un archivo de texto cada vez que se recibe la señal de GATE. Básicamente cada uno de estos archivos es leído mediante un programa, el cual genera un histograma de cada una de las 17 columnas

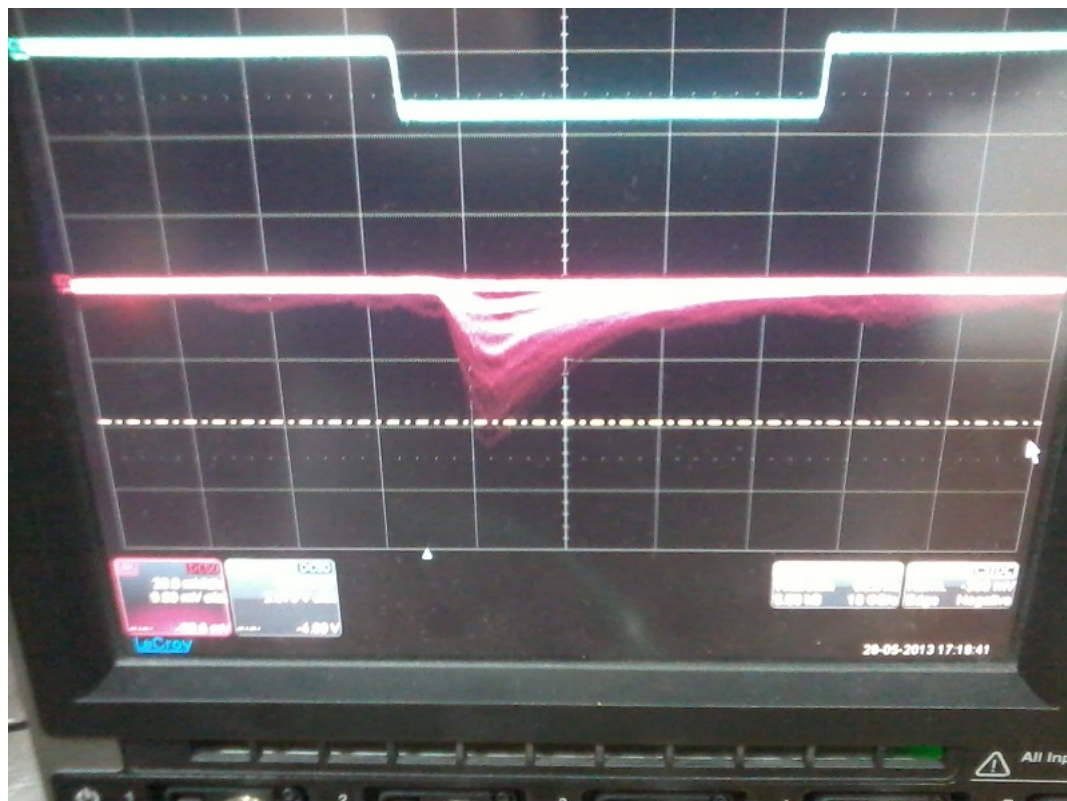


Figura 4.2: Forma de onda producida por un MPPC (abajo $20[mV/div]$) con la señal de GATE (arriba $1[V/div]$), la escala temporal es $20[ns/div]$. Note que se ha configurado un nivel de persistencia en el osciloscopio.

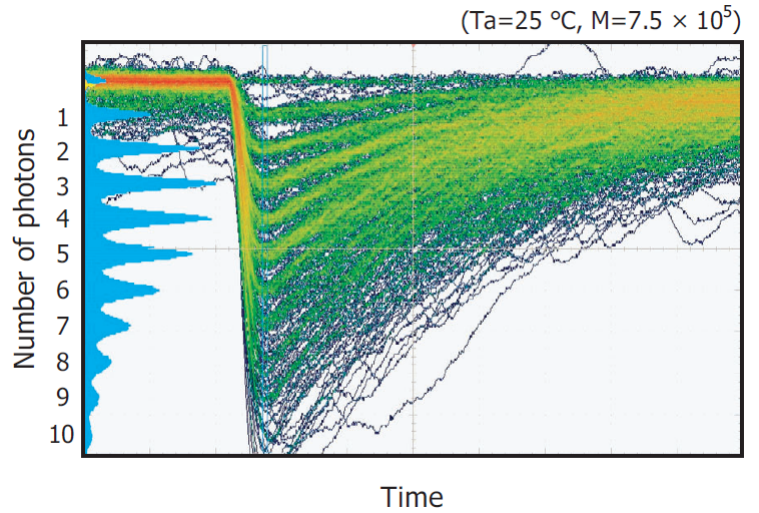


Figura 4.3: Pulsos producidos y correspondencia con histograma según fabricante.

presentes en cada archivo (los 16 canales del MPPC y 1 canal por el PMT). Típicamente se realizan 50000 eventos por cada medición, tanto de mediciones sin luz y con luz para cada nivel de tensión. Por lo tanto se obtienen histogramas con 50000 entradas cada uno, esto permite tener suficiente estadística. Sin embargo, estos histogramas están creados en base a números enteros entregados por el adquisidor de datos a los que llamamos unidades de QDC por lo que es necesario convertir estos números a un equivalente en carga, considerando que cada unidad de QDC representa $0,1[C]$. Esto último es necesario solamente a la hora de calcular la ganancia del MPPC ya que para el resto de los parámetros esto es irrelevante.

Una vez disponiendo de los histogramas, la primera operación es realizar un corrimiento de este en términos de unidades de QDC ya que en la práctica, el pedestal no se encuentra centrado en cero. Este corrimiento es debido a un *offset* interno del adquisidor de datos aunque también podría deberse a la presencia de corrientes continuas ya que el pedestal representa la ausencia de avalanchas por tanto la carga aportada debiera ser cero. Para realizar este corrimiento se considera una medición en ausencia de luz. El *peak* del pedestal será el de mayor amplitud, por lo que sólo hace falta encontrar el máximo en este histograma para saber aproximadamente la posición de este. Luego se realiza un ajuste de una campana de Gauss alrededor del máximo, lo que retorna la posición exacta del pedestal, con esto es

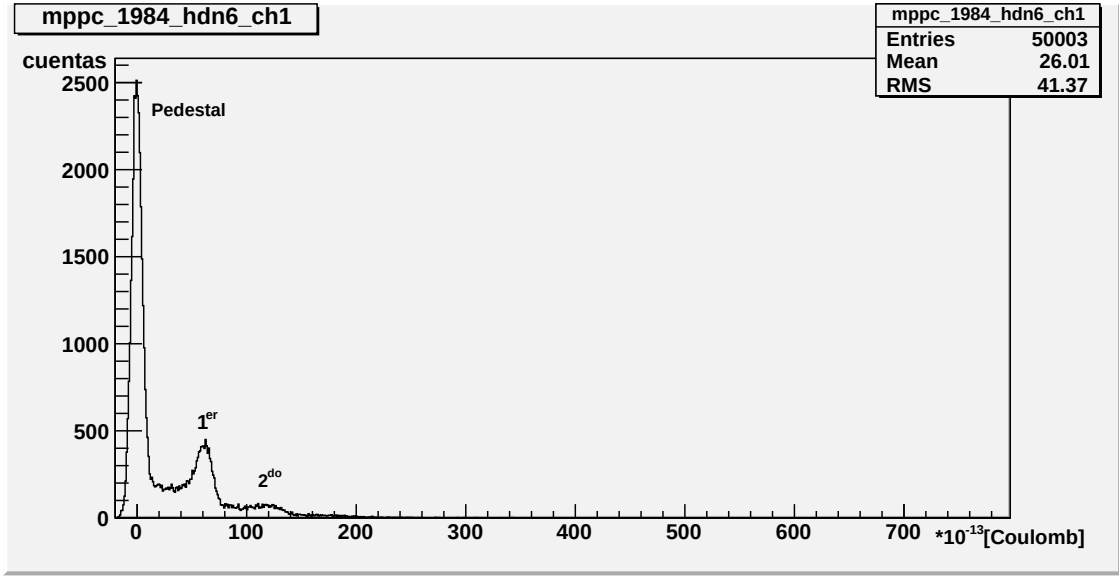


Figura 4.4: Medición en ausencia de luz.

posible crear nuevamente el histograma, esta vez restando a cada número o unidad de QDC la media del pedestal para cada canal. Este es el método para realizar el corrimiento descrito en la sección 2.2.

Una ventaja de utilizar las librerías de ROOT para este análisis, es que se trabaja cada histograma como un objeto, al cual se le pueden agregar eventos, buscar máximos, realizar diversos tipos de ajustes (en inglés *Fit*), integrar, entre otras herramientas disponibles.

En el histograma sin luz de la figura 4.4, todos los eventos que se produjeron fuera del pedestal, fueron debido al efecto del *dark noise*, ya que no hay inyección de luz. Para determinar el *dark noise* se realiza una integral de los eventos del pedestal desde -3σ a $+3\sigma$, considerando σ la desviación estándar del ajuste realizado con anterioridad, y dividir esta cantidad de eventos por los eventos totales, obteniendo así la probabilidad de detectar cero avalanchas. CON esta probabilidad es posible determinar la probabilidad, dada una señal de integración GATE, de que una cuenta oscura o *dark noise* quede dentro del GATE, en este caso la probabilidad es de un 38 %,

$$P_{DarkNoise} = 0,38$$

Típicamente el *dark noise* es presentado como *dark rate* que expresa la frecuencia de ocurrencia

de disparos por efectos de temperatura o falsos positivos. En este caso el *dark rate* resulta ser,

$$Dark_{rate} = \frac{P_{darknoise}}{120[ns]} = \frac{0,38}{120[ns]} = 3,2[MHz]$$

Una vez conociendo la posición del pedestal en la medición sin luz, se espera que el pedestal se encuentre en la misma posición en la medición con luz. Sin embargo, el adquisidor de datos desplaza el pedestal en un par de puntos, por lo que se realiza nuevamente un ajuste del pedestal (figura 4.5a). Luego se grafica el histograma restando este valor para mover el pedestal a cero. Posteriormente se calcula la posición del primer *peak* por medio de un ajuste de una distribución gauseana como se observa en la figura 4.5b. La media de esta gauseana es equivalente a la ganancia del MPPC en términos de unidades de QDC para ese nivel de tensión en particular.

En el caso de la figura 4.5b la media de la distribución gauseana ajustada al primer *peak* se encuentra en la posición 68, aplicando la formula vista en la sección 2.2.2, la ganancia resulta:

$$Ganancia = \frac{68 * 0,1[pC]}{67 * 1,6 * 10^{-19}} = 6,3 * 10^5$$

Finalmente para calcular la cantidad de fotones detectados, se realiza una integral del pedestal en el histograma con luz, siguiendo la misma lógica que en la medición sin luz. Con la probabilidad de obtener cero avalanchas se puede utilizar el método descrito en la sección 2.3 con el fin de determinar la media de fotones detectados.

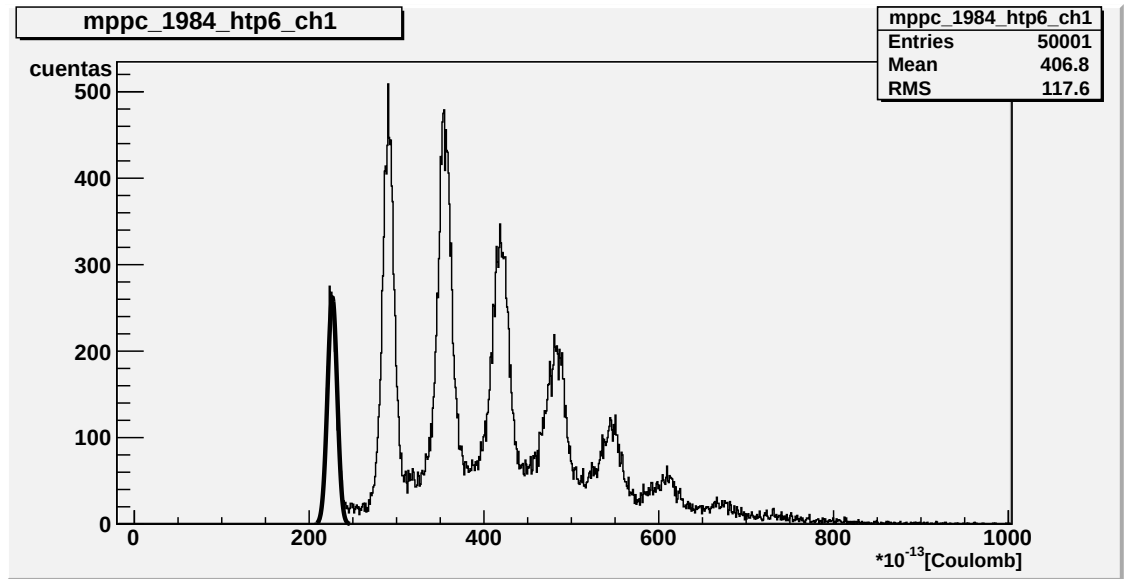
Cabe destacar que si se intenta realizar esto en la medición sin luz, el resultado obtenido para los fotones detectados será distinto de cero debido al efecto del *dark noise*. Es por esto que la probabilidad de no tener avalancha se debe corregir utilizando la probabilidad de *dark noise*. Si x es la probabilidad de obtener un evento en el pedestal, se debe multiplicar x por un factor que depende de la probabilidad de *dark noise*

$$P_0 = x * \left(1 + \frac{P_{DarkNoise}}{1 - P_{DarkNoise}}\right)$$

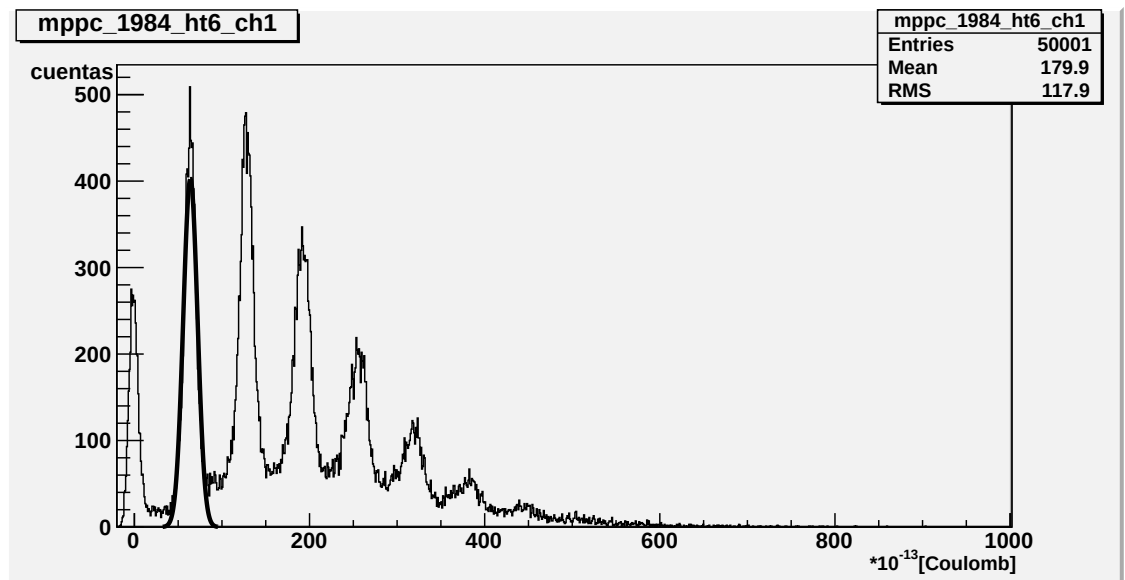
Una vez teniendo la probabilidad de tener eventos en el pedestal corregida, sólo se debe calcular

$$\lambda = -\ln(P_0)$$

donde λ es la media de fotones detectados. En el caso de la figura 4.5b, la integral del pedestal resulta



(a)



(b)

Figura 4.5: Histogramas de mediciones con luz, a) se realiza un ajuste con una gauseana del *peak* correspondiente al pedestal. b) se ha restado la posición del pedestal y se ha realizado un ajuste de una gauseana al primer *peak*.

ser igual a 2630, valor que se debe corregir con la formula anterior:

$$P_0 = 2630/50000 * (1 + \frac{0,38}{1 - 0,38}) = 0,085$$

Luego,

$$\lambda = -\ln(0,085) = 2,46[\text{fotones}]$$

Para realizar la estimación de la eficiencia sólo hace falta estimar la cantidad de fotones incidentes en el MPPC. Para esto primero se debe estimar la cantidad de fotones detectados por el PMT utilizando la calibración realizada. Considerando los datos obtenidos del PMT de la figuras 4.6a y 4.6b y utilizando la aproximación descrita en la sección 4.1 se obtiene:

$$N_{\text{fotones}} = \frac{83,9^2}{25,29^2 - 9,29^2} = 12,7[\text{fotones}]$$

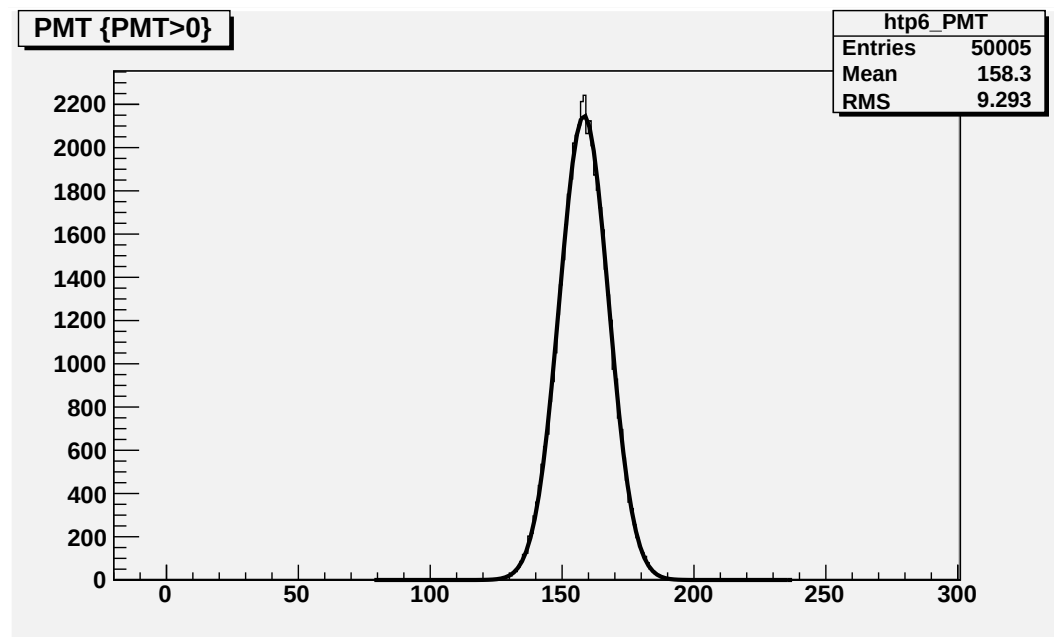
Cabe aclarar que este PMT no posee tanta resolución como el MPPC y no es posible distinguir entre un *peak* y otro. Además, en este caso la cantidad de fotones detectados por el PMT no son pocos, por lo que tampoco es posible utilizar el mismo método de estimación de fotones detectados que se utiliza para el MPPC.

De acuerdo con la calibración previamente realizada, se tiene que al detectar 10 fotones en el PMT, la luz inyectada al MPPC en el canal 1 corresponde a 6,56 fotones, por tanto en este caso la luz incidente corresponde a 8,33 fotones.

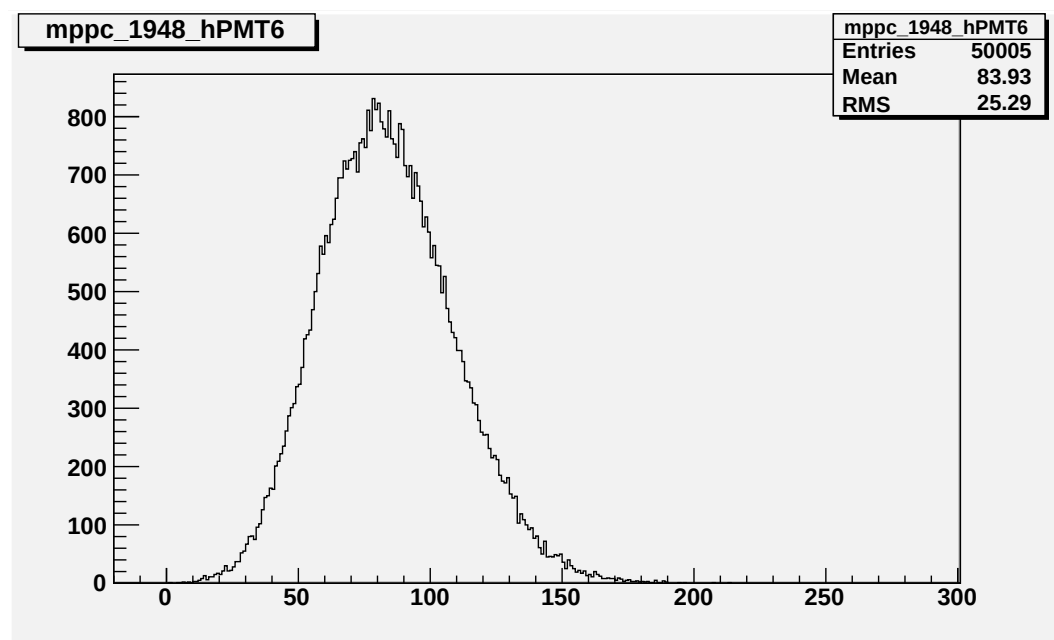
Con estos datos la Eficiencia de detección de fotones resulta:

$$PDE = \frac{N_{\text{fotones detectados}}}{N_{\text{fotones incidentes}}} = \frac{2,46}{8,33} = 29,5 \%$$

El fabricante de este MPPC provee una curva de PDE vs longitud de onda que corresponde a un máximo teórico, para una probabilidad de avalancha de 100 %. En la figura 4.7 se observa la información provista por el fabricante, que se asume corresponde a la multiplicación del factor geométrico por la eficiencia cuántica (sección 1.4.4). Para la longitud de onda considerada, la máxima eficiencia sería aproximadamente 47 %. Es probable que al aumentar la sobretensión se lleguen a eficiencias cercanas a este valor.



(a)



(b)

Figura 4.6: Histogramas obtenidos para el PMT, a) sin luz. b) con luz habiendo restado ya la posición del pedestal.

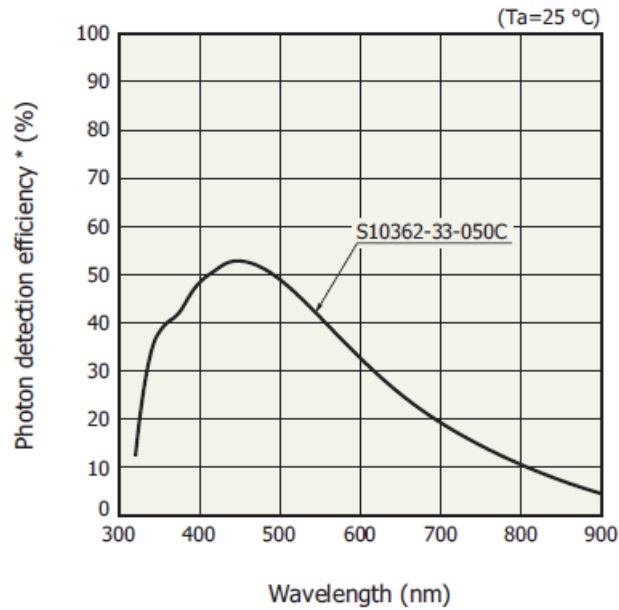


Figura 4.7: Curva provista por el fabricante. PDE vs longitud de onda.

4.3. Medición de un MPPC

Para la medición de un MPPC se aplica el procedimiento descrito en la sección 4.3 (asumiendo que ya se poseen los datos almacenados) a cada uno de los canales del MPPC y a distintos niveles de tensión. El resultado de la medición de la ganancia para distintas tensiones en el canal 1 del MPPC número 1984, se muestra en la figura 4.8. Si se observa el título del histograma de la figura 4.5b, en la sección anterior, *ht6* hace referencia a la medición de sobretensión número 6 partiendo desde 0, es decir, cuando ya se ha aumentado la tensión de polarización en 0,6[V]. Para este caso se calculó la ganancia también en la sección anterior, donde ésta resultó ser de $6,5 \times 10^5$. Se observa en la figura 4.8 que el séptimo punto de este gráfico corresponde a esta ganancia de $6,5 \times 10^5$. También se observa que al extrapolar el ajuste lineal, la ganancia 0 se da para una tensión aproximada de 72,2[V] que corresponde a la denominación de tensión de ruptura o *Breakdown Voltage*.

El mismo procedimiento se realiza para todos los canales, con el objetivo de calcular la tensión

de ruptura de todos los canales y caracterizar la ganancia. En el cuadro 4.1 se muestran los datos que se extraen de los gráficos. A partir de estos datos es evidente que los canales del mismo MPPC no poseen exactamente las mismas propiedades, aunque son muy semejantes. Estar consciente de la dispersión entre los canales es importante ya que típicamente todos los canales se polarizan con la misma tensión. Es por esto que la ganancia que se muestra en el cuadro 4.1 se calcula a 0.9[V] por sobre la tensión de ruptura promedio.

Se ha elegido calcular las variables a 0.9[V] de sobretensión bajo el supuesto que este nivel de polarización, permite operar a una ganancia alta y con eficiencia considerada como alta en la literatura. La razón de no preferir tensiones mayores es debido al excesivo aumento del *dark noise*.

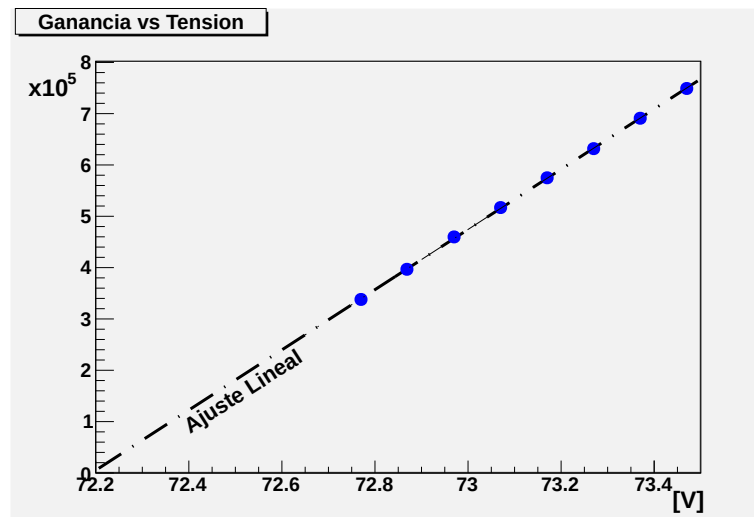


Figura 4.8: Ganancia versus tensión de polarización para el canal 1 del MPPC 1984.

La diferencia entre la máxima y mínima ganancia en el cuadro 4.1 entre los distintos canales es de aproximadamente 11 %. También puede esperarse una diferencia del mismo orden entre los píxeles de un mismo canal, y es esto lo que produce la distribución gauseana de los *peaks* en el histograma. Es por esto mismo que mientras más fotones son detectados, estos *peaks* se observan más anchos.

Canal	BDV [V]	C[pF]	G
1	72,192	0,088	462406
2	72,170	0,088	473536
3	72,199	0,088	458747
4	72,135	0,088	492969
5	72,134	0,089	496879
6	72,127	0,087	491664
7	72,145	0,086	477158
8	72,139	0,087	485618
9	72,116	0,086	490156
10	72,135	0,087	484501
11	72,094	0,084	490842
12	72,089	0,085	501011
13	72,125	0,085	478876
14	72,124	0,09	508969
15	72,089	0,086	505533
16	72,055	0,084	512152
prom	72,13	0,087	488189

Cuadro 4.1: Datos obtenidos al graficar la ganancia v/s tensión. con temperatura de 37°C al interior de la caja oscura BDV: BreakdownVoltage. C: Capacitor ficticio. G: Ganancia obtenida a BDV promedio + 0.9[V]

Cabe recordar que C es la capacitancia de un pixel, o al menos en promedio por canal. Para calcular C se debe tomar la pendiente en el ajuste lineal de la ganancia, la cual está expresada en términos de electrones y multiplicar esta misma pendiente por la carga de un electrón. Para el canal 1 del MPPC en cuestión, la capacitancia resulta ser:

$$552400[e/V] * 1,6 * 10^{-19}[Coulomb] = 8,8 * 10^{-14}[Coulomb/V] = 0,0884[pF] = 88,4[fF]$$

Según el fabricante, la capacitancia terminal, o mejor dicho medida en cada canal es de $320[pF]$, si consideramos que cada canal posee 3600 pixeles conectados en paralelo, cada pixel debería tener una capacitancia de $320/3600[pF]$, es decir, $88,8[fF]$ lo cual es muy cercano al valor obtenido.

La tensión de ruptura promedio para este MPPC con una temperatura al interior de la caja de $37^{\circ}C$ es de $72,13[V]$. La tensión de polarización utilizada para este MPPC dada la ganancia, PDE y *dark noise* es de $0.9[V]$ por sobre la tensión de ruptura, es decir, $73,03[V]$.

Se debe tener presente que, si bien la tensión de ruptura varía con respecto a la temperatura, C no varía con respecto a la temperatura. Es decir, si bien la ganancia no varía directamente con la temperatura, si lo hace indirectamente debido a que varía con respecto a la tensión de ruptura, la cual sí varía con respecto a la temperatura. Lo mismo sucede con la eficiencia de detección de fotones o PDE. Es por esta razón que es común hablar en términos de tensión por sobre la tensión de ruptura o sobretensión (también conocido en inglés por *over-voltage*).

En la figura 4.9 se ha graficado la ganancia en función de la sobretensión de cada canal, se observa el comportamiento uniforme y la tendencia de los canales. Se observa que a $0.9[V]$ de sobretensión, la diferencia entre el máximo y el mínimo de ganancia es de tan sólo $0,2 * 10^5$, sin embargo, este dato puede resultar engañoso, dado que la tensión de ruptura es distinta para cada canal. En la figura 4.10 se observa la dependencia de la ganancia en función de la tensión de polarización. sólo en esta figura se puede apreciar realmente las diferencias entre las ganancias alcanzadas por cada canal al polarizar todos estos con la misma tensión. Aquí, la diferencia entre el máximo y el mínimo de ganancia es de $0,6 * 10^5$.

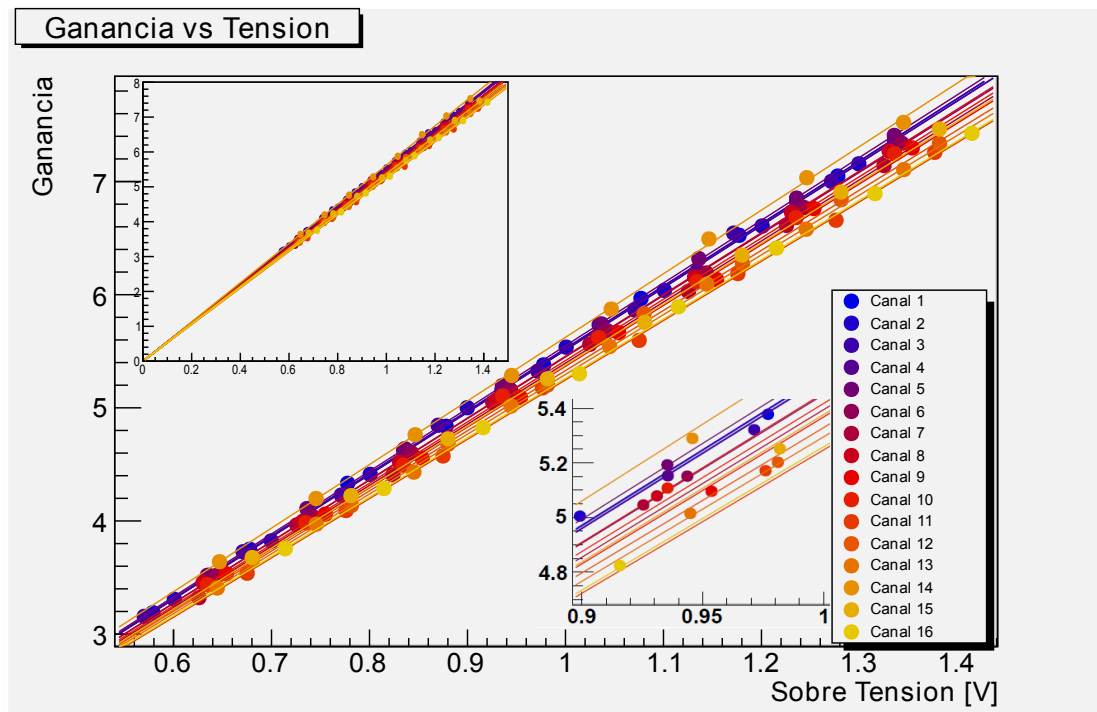


Figura 4.9: Ganancia versus sobretensión para todos los canales del MPPC.

Por otra parte, los resultados mostrados en la figura 4.9 o 4.10 pueden ser utilizados como método de corroboración visual, ya que cualquier error algorítmico o error de programa al realizar un ajuste, se vería reflejado en estos gráficos. Los errores típicos son de un mal ajuste ya sea de distribución gauseana o regresión lineal, los cuales se reflejan en los gráficos por un punto fuera de lugar (*outlier*) o una línea que no pasa por todos los puntos.

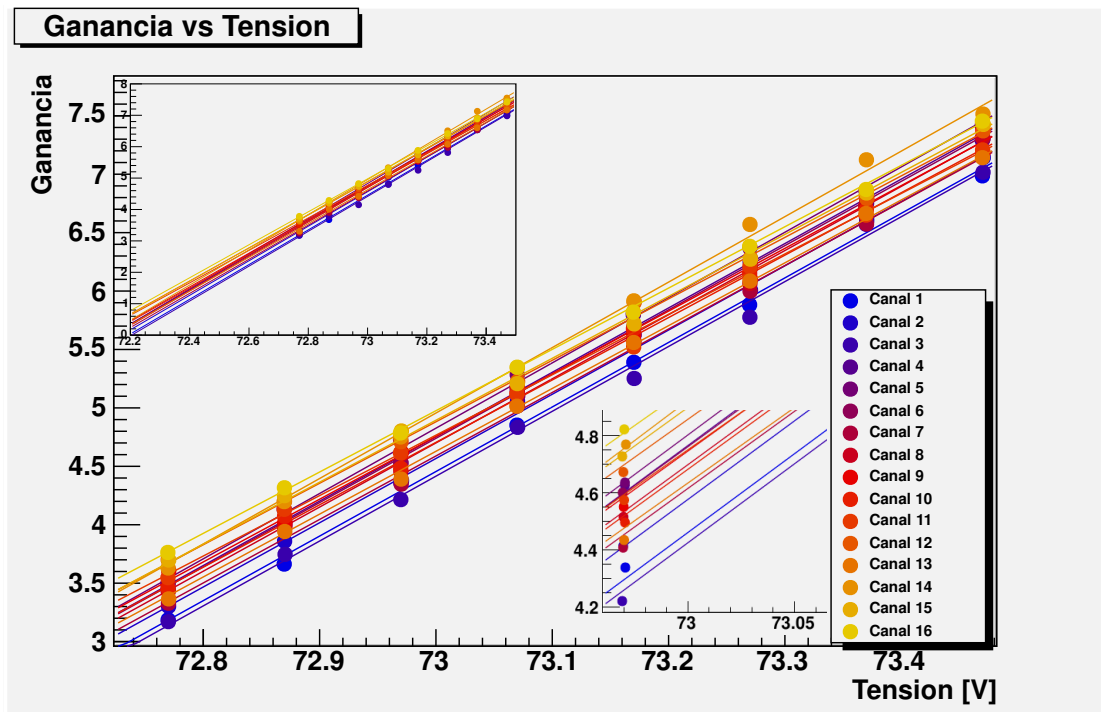
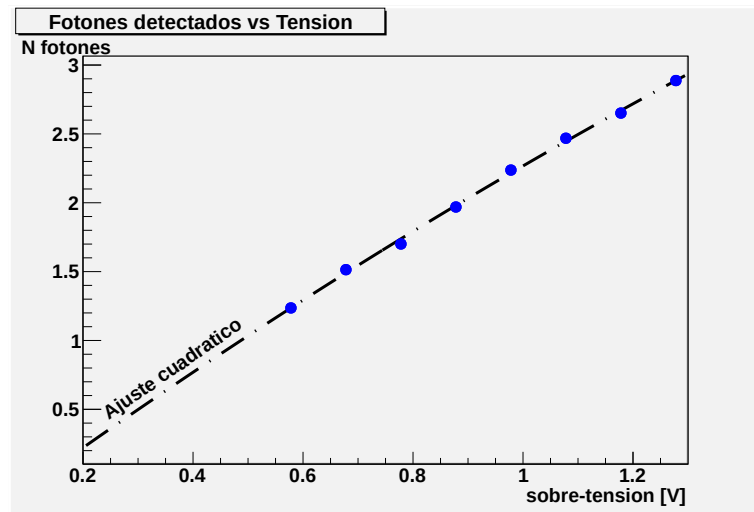
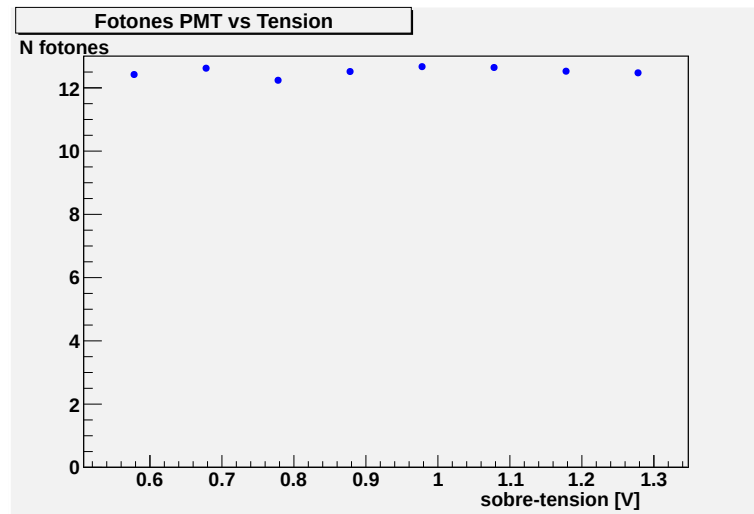


Figura 4.10: Ganancia versus tensión para todos los canales del MPPC.

Se realiza también el procedimiento descrito en la sección anterior para estimar el número de fotones detectados por cada canal para cada tensión en un MPPC. Usando la calibración de la estación se calcula el número de fotones incidentes para luego calcular la eficiencia de detección de fotones.



(a)



(b)

Figura 4.11: a)Numero de fotones detectados versus tensión de polarización para el canal 1 del MPPC 1984. b) fotones detectados por el PMT.

En la figura 4.11a se observa la cantidad de fotones detectados en función de la sobretensión para el canal 1 del MPPC 1984. Como se observa en la figura 4.11a la dependencia con respecto a la sobretensión es cuadrática. Dado que el punto de interés difícilmente es medido exactamente, los fotones

detectados con 0,9[V] de sobretensión son calculados mediante el ajuste cuadrático. Para calcular los fotones incidentes se utiliza la calibración descrita en la sección 4.1, considerando que ya se ha calculado el número de fotones detectados por el PMT (figura 4.11b). Al observar la figura 4.11b se observa que la cantidad de fotones detectados por el PMT no es constante. Al observar con detención se ve que el segundo punto es uno de los más altos y el tercero es de los más bajos, esto calza con la medición del número de fotones detectados por el MPPC donde el segundo sobrepasa el ajuste cuadrático y el tercero está por debajo apreciando una alta correlación.

Finalmente para calcular el PDE se aplica el procedimiento descrito en la sección 4.2 a cada punto de medición disponible. Una vez calculado el PDE en estos puntos se realiza otro ajuste cuadrático sobre la curva de PDE como se muestra en la figura 4.12

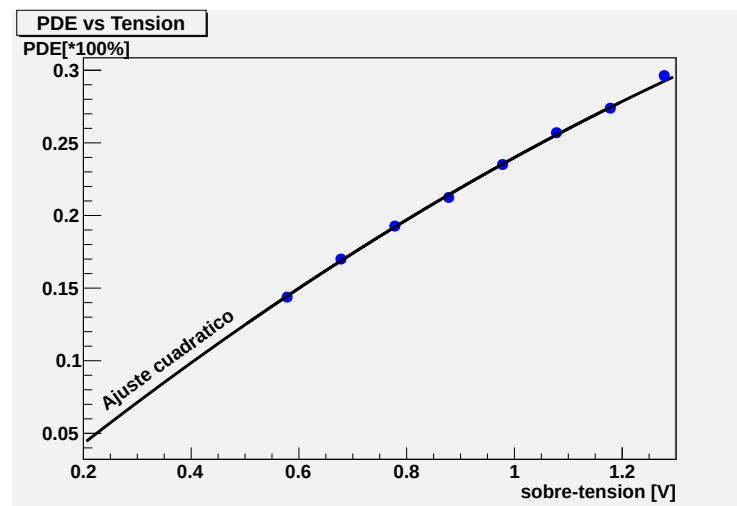


Figura 4.12: PDE versus tensión de polarización para el canal 1 del MPPC 1984.

Visualmente se puede notar que el ajuste del PDE es mejor que el número de fotones detectados, esto se debe a que los fotones incidentes no son constantes. Esto también queda evidenciado al observar el error del ajuste que resulta ser de $8,5 \times 10^{-6}$ para el PDE y $3,4 \times 10^{-3}$ para el de número de fotones detectados.

canal	N fotones	Fot. Incidentes	PDE
1	1,69	8,24	0,205
2	1,99	9,16	0,217
3	1,86	8,92	0,209
4	1,91	8,39	0,228
5	2,04	9,01	0,226
6	1,78	7,98	0,223
7	1,98	8,80	0,225
8	2,40	10,58	0,227
9	2,46	10,41	0,236
10	2,10	9,25	0,227
11	2,18	9,12	0,239
12	1,60	7,63	0,210
13	1,76	7,87	0,224
14	1,67	7,96	0,210
15	1,70	7,65	0,222
16	1,75	7,83	0,223
prom	1,93		0,222

Cuadro 4.2: Número de fotones detectados y PDE calculado para 0.9[V] de sobretensión. Fotones incidentes según calibración.

En el cuadro 4.2 se observan la cantidad de fotones detectados, el número de fotones incidentes y la eficiencia de detección de fotones, todos para una tensión de polarización de 0,9[V] de sobretensión. El resumen del PDE vs la tensión de polarización calculado para el mismo MPPC se muestra en la figura 4.13. Se observa una diferencia entre el mínimo y el máximo de 4 puntos de eficiencia para una misma tensión de polarización

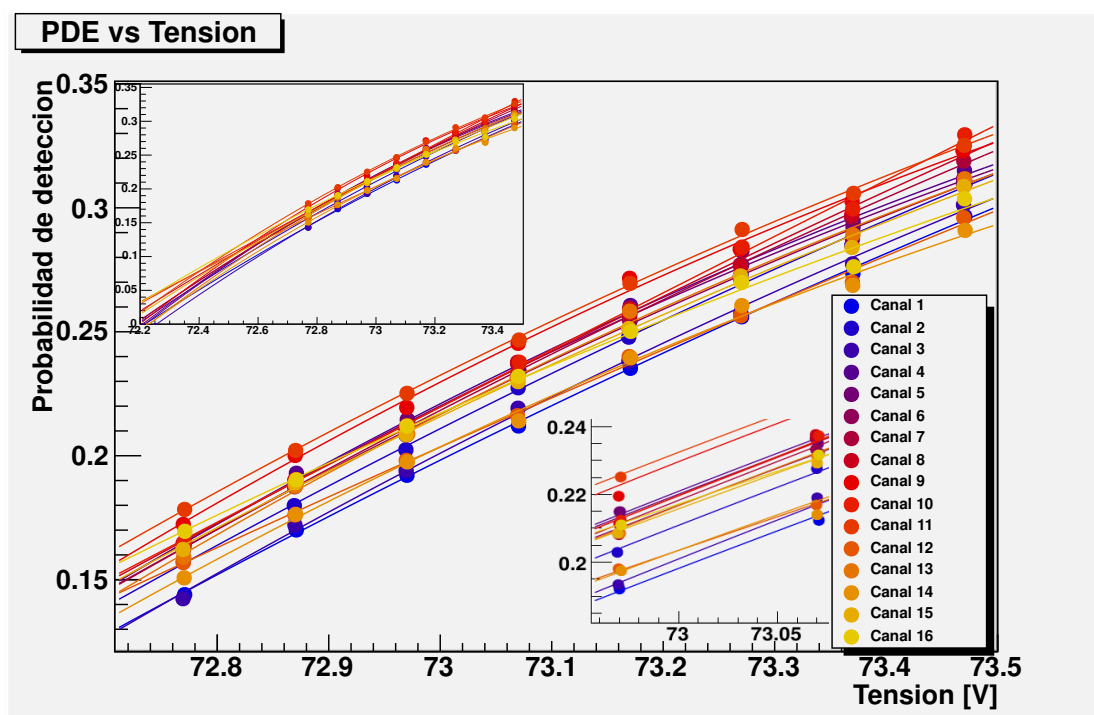


Figura 4.13: Estimación de eficiencia de detección de fotones por todos los canales del MPPC vs sobre-tensión.

4.4. Resultados generales

Para este trabajo se realizó la caracterización de más de 1500 MPPCs. Con estos datos se puede observar la dependencia de la ganancia, *dark noise* y la eficiencia de detección de fotones con respecto a la tensión de polarización y la tensión de ruptura promedio de todos los MPPC. Además, se puede apreciar la dispersión de las características, es decir, como pueden variar por ejemplo la ganancia de un MPPC a otro para el mismo nivel de polarización.

En la figura 4.14a se muestra un histograma de las tensiones de ruptura promedio obtenidas para cada MPPC. De aquí se extrae que en promedio la tensión de ruptura es de $71,73[V]$ a una temperatura aproximada de $38[^\circ C]$ al interior de la caja oscura. Si se observa la eficiencia de detección de fotones en la figura 4.12, y se compara la eficiencia obtenida a $0,6[V]$ de sobretensión con aquella a $0,9[V]$ de sobretensión, se aprecia una diferencia de por lo menos un 30 %. En el histograma se observa la desviación estándar de $0,28[V]$ en la tensión de ruptura. Esto quiere decir que de no calcularse para cada caso la tensión de ruptura para fijar correctamente la tensión de polarización, se podría incurrir en un error incluso superior al 30 %. Esto sólo por no conocer correctamente el nivel de polarización requerido.

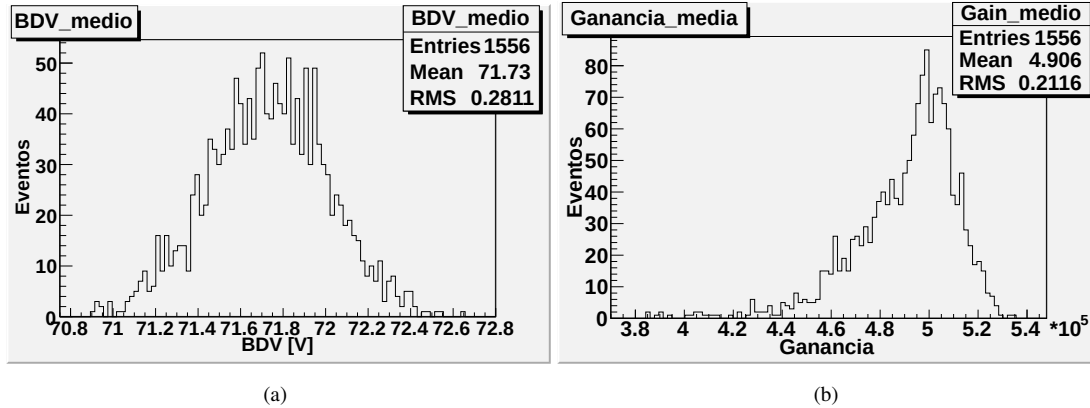


Figura 4.14: Histograma de la tensión de ruptura y de la ganancia promedio a $0,9[V]$.

La figura 4.14b muestra un histograma de la ganancia promedio por MPPC a $0,9[V]$ de sobretensión. Se observa que la dispersión en este caso es de aproximadamente 4,3 %, aunque hay valores que

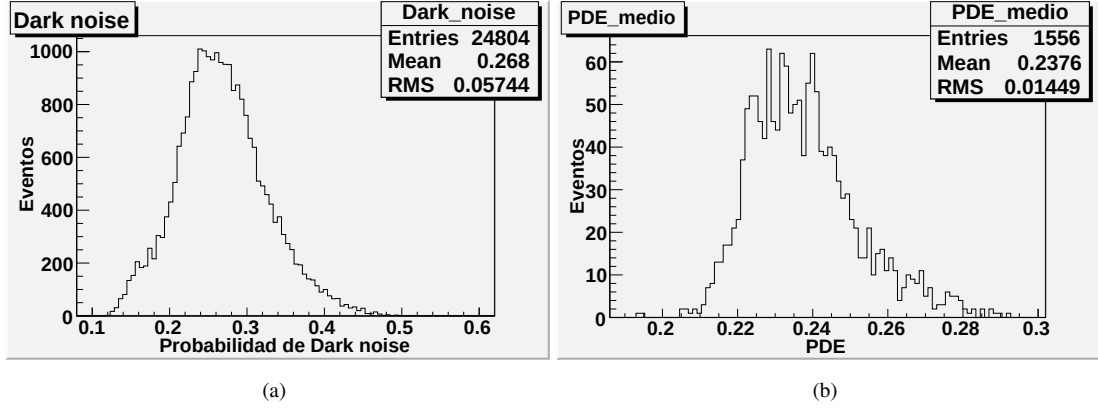


Figura 4.15: Histograma de *dark noise* y PDE a 0,9[V] de sobretensión.

se escapan en más de un 20 % de la media. En la experiencia adquirida durante el análisis de los datos de los más de 1500 MPPCs, se puede decir que basta conocer que la ganancia se encuentra alrededor de $5 * 10^5$ para estimar los amplificadores a utilizar y las capacidades del sistema de adquisición de datos o en general la electrónica a utilizar. Por otra parte, si se conoce con exactitud la característica de ganancia vs tensión de polarización, basta con medir la ganancia para inferir la sobretensión actual, ya que es independiente de la temperatura [16]. También es posible estimar a que temperatura se encontraría operando el MPPC midiendo la tensión aplicada, recordando que según el fabricante la tensión de ruptura cambia con la temperatura a una razón de $56[mV/^{\circ}C]$.

En la figura 4.15a se observa el *dark noise* por canal a 0,9[V] de sobretensión. Ésta está expresada en términos de probabilidad de que se dispare un pixel y que parte del pulso generado se sitúe dentro de la ventana de integración. Dado que típicamente el *dark noise* es presentado como *dark rate*, este en promedio resulta ser,

$$Dark_{rate} = \frac{P_{darknoise}}{120[ns]} = \frac{0,268}{120[ns]} = 2,23[MHz]$$

Últimamente es común que al menos Hamamatsu provea junto con los MPPCs, una hoja en donde se especifica el *dark rate* y la tensión de polarización para lograr una determinada ganancia a $T_a = 25^{\circ}C$. Sin embargo, la eficiencia de detección de fotones no viene incluida, sólo se provee el límite teórico que bordea el 50 %. En la figura 4.15b se observa el histograma de la eficiencia de detección de fotones promedio a 0,9[V] de sobretensión. Ésta bordea el 24 % de eficiencia y está acotada en su mayoría entre

un 19 a un 30 % encontrándose el 98 % de los casos entre el 21 y el 28 % de eficiencia.

No solamente se puede deducir que los valores típicos de operación son acotados, si no que la dependencia con la tensión de polarización también es muy similar.

Se debe notar que las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 están graficadas por cada canal de los 1556 MPPC con respecto a la sobretensión para cada MPPC. En este sentido la dependencia del *dark noise*, ganancia y PDE con respecto a la sobretensión está bien definida siendo claramente el mejor ajuste uno lineal para las dos primeras y cuadrático para el PDE.

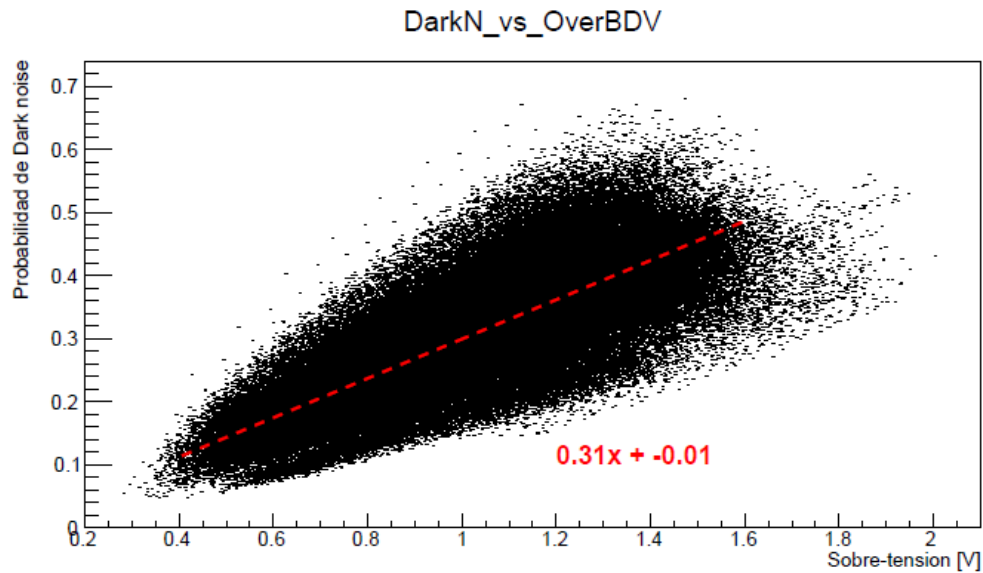


Figura 4.16: *Dark noise* vs sobretensión.

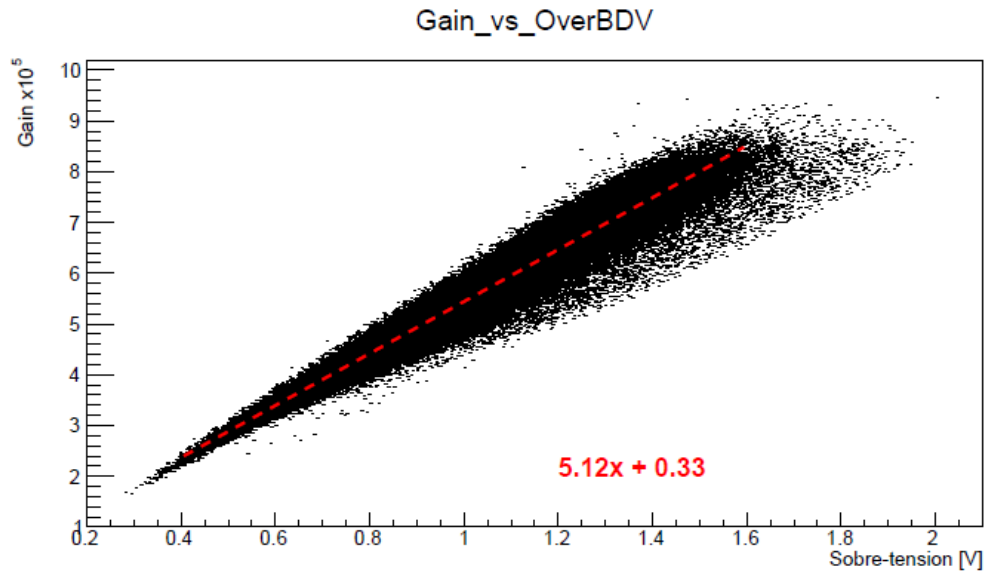


Figura 4.17: Ganancia vs sobretensión.

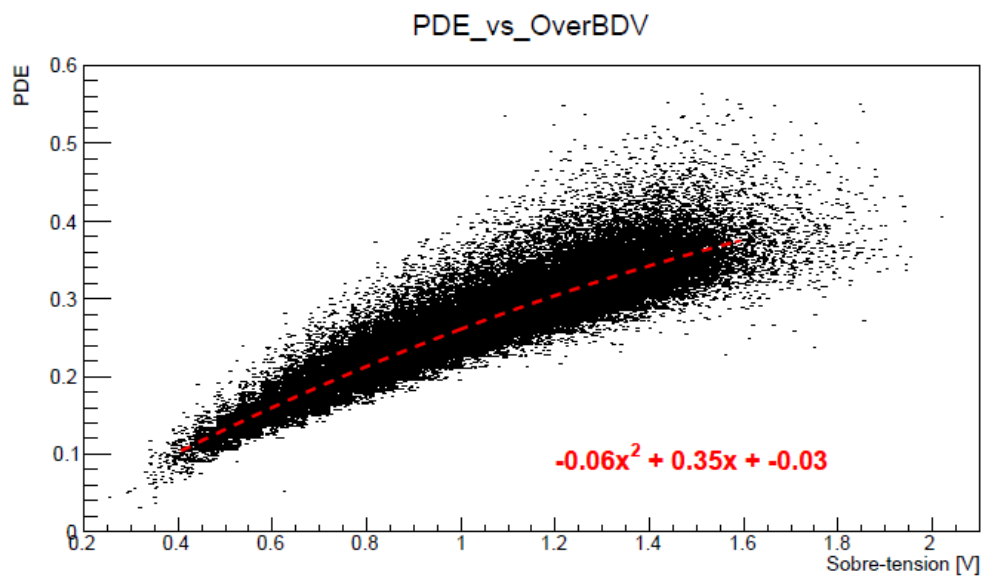


Figura 4.18: PDE vs sobretensión.

Por el contrario, si en vez de graficar la ganancia o el PDE con respecto a la sobretensión, se grafica con respecto a la tensión de polarización como en las figuras 4.19 y 4.20, no se puede definir un ajuste, no se puede saber con que ganancia operará el MPPC. Es por esto que la tensión de ruptura es tan importante a la hora de utilizar estos dispositivos, no solamente para evitar dañar el MPPC, si no también porque esto permite saber cual es la ganancia o eficiencia a la cual operaría este. Como se explicó anteriormente, basta con conocer la tensión de ruptura y ya se puede tener una idea de las características esperadas, utilizando los ajustes de los gráficos 4.16, 4.17 y 4.18.

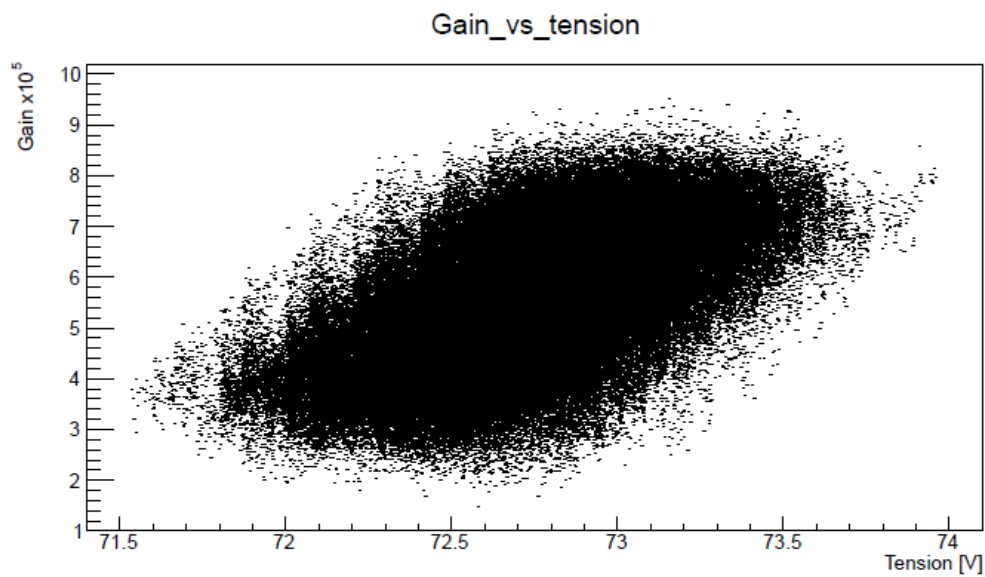


Figura 4.19: Gain vs tension.

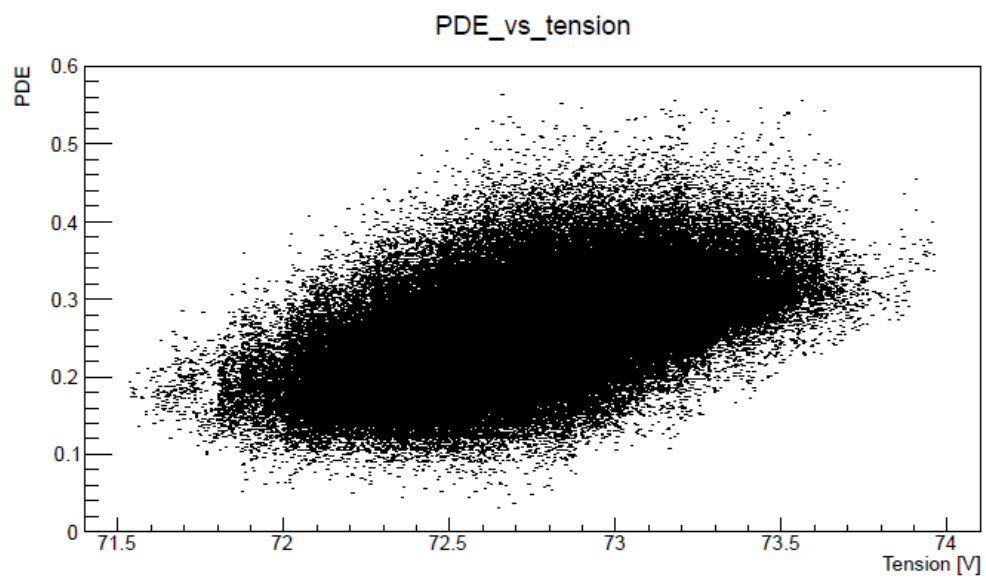


Figura 4.20: PDE vs tension.

Capítulo 5

Conclusiones

Más de 1500 MPPCs fueron caracterizados en el desarrollo de este trabajo. Estos fueron caracterizados para una luz proveniente de una fibra *wavelength shifting* de longitud de onda de 520[*nm*] promedio. Este modelo de MPPC demostró poseer una ganancia del orden de $5 * 10^5$, acorde con la información que provee el fabricante, y una eficiencia de detección de fotones de alrededor de 24 %, la cual no es especificada por el fabricante.

La estación de medición desarrollada logró cumplir satisfactoriamente con los requisitos especificados para medir tal cantidad de sensores, tanto por la electrónica y conexiones realizadas, como por la automatización del proceso de medición que permitió disminuir casi a cero los errores humanos. El operador de la máquina sólo conectó cada MPPC y ejecutó un programa automatizado. Durante el proceso sólo para dos MPPC se repitió la medición dado un error al introducir el número identificador del MPPC. De un total de 1700 MPPC que fueron sometidos a medición alrededor de 150 mediciones fueron descartadas automáticamente por el programa debido a que los ajustes, tanto de distribuciones gaussianas como ajustes lineales, poseían errores de ajuste elevados. Dada la cantidad de tiempo necesario para realizar el análisis manualmente simplemente se descartaron estos datos y se repitieron las mediciones.

Por otra parte, dado el trabajo y la experiencia adquirida tanto con los PMTs como con los MPPC, se considera que estos últimos son dispositivos con mucho potencial ya que poseen grandes mejoras

con respecto a sus antecesores de tubos al vacío (PMT). Si bien en un MPPC no es posible obtener resolución en energía como en un tubo fotomultiplicador, hoy en día existen cristales centelleadores y algunos plásticos centelleadores que hacen posible la conversión de energía a cantidad de fotones por lo que en conjunto el desempeño como medidores de cantidad de energía podría ser incluso mejor. Por otra parte la capacidad de lograr detectar tan sólo un fotón permite realizar mediciones que antes requerían de un PMT de excesivo valor.

Sin embargo, el MPPC también posee algunas características no deseables. El *dark noise* puede llegar a ser considerablemente alto dependiendo de la temperatura, es altamente recomendable por este motivo trabajar con este a bajas temperaturas o incluir algún sistema de disipación de calor. El *dark rate* también fue calculado y se encontró que este es en promedio $2,23[MHz]$ a una temperatura del MPPC de aproximadamente $40^{\circ}C$. Para tensiones mayores, este puede llegar a ser incluso $6[MHz]$, que es el valor que indica el fabricante.

Por otra parte, la forma de onda que generan las avalanchas son de una duración aproximada de $80[ns]$ lo que limita la resolución temporal, este factor puede ser crítico en algunas aplicaciones como mediciones de tiempo de vuelo (TOF) en tomografías PET. La literatura menciona circuitos de extinción de avalancha que podrían mejorar esta característica, pero requieren su propia investigación.

Una característica interesante que se podría considerar para trabajos posteriores es el *cross-talk* óptico, que si bien no debiera afectar en la estimación utilizada para fotones detectados, no existen muchos estudios al respecto.

Para efectos de cálculo en este trabajo, se consideró el punto de operación a $0,9[V]$ de sobre tensión. Otros estudios más recientes han encontrado que la tensión de polarización óptima oscila entre $0,9$ y $1,2[V]$ por sobre la tensión de ruptura. Por esta razón, se considera que el punto de operación seleccionado fue acertado. Este punto de operación óptimo se encuentra maximizando funciones de señal a ruido, considerando PDE y ganancia como señal y *dark noise* como ruido.

El espectro que es capaz de medir este MPPC, lo hace ideal para trabajar con plásticos centelleadores, ofreciendo detectores de bajo costo, ligeros, más pequeños y portátiles, además de gran estabilidad y robustez ya que ahora el detector completo puede ser de estado sólido.

Bibliografía

- [1] Jose Cuevas Martín. Fotografía y conocimiento, la imagen científica en la era electrónica(desde los orígenes hasta 1975). ,pagina 160, 1975.
- [2] et al. V. K. ZWORYKIN. The secondary emission multiplier-a new electronic device. P. of I. of Radio Engineers, Vol 24 N.3, 1936.
- [3] K. G. McKay. Avalanche breakdown in silicon. Physical Review, Volumen 94 N.92, 1954.
- [4] A. ROCHAS ET AL. Low-noise silicon avalanche photodiodes fabricated in conventional cmos technologies. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 49, NO. 3, MARCH 2002.
- [5] Yi Quing et al. Radiation hardness tests of sipms for the jlab hall-d barrel calorimeter. Jefferson Lab, 12000 Jefferson Ave, Newport News, VA 23606.
- [6] E. Garutti et al. Application of novel silicon-based photo-detector to calorimetry and medical physics. Nuclear Science Symposium Conference Record, 2007.
- [7] A.Ñepoomuk et al. New results from a test of silicon photomultiplier as readout for pet.
- [8] K. Yamamoto. Development of multi-pixel photon counter (mppc). 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record N30-102, 2006.
- [9] J. Swain Y. Musienko, S. Reucroft. The gain, photon detection efficiency and excess noise factor of multi-pixel geiger-mode avalanche photodiodes. Elsevier, 2006.

- [10] P. BUZHAN et al. The advanced study of silicon photomultiplier. Instrumentation Bulletin, Fall 2001.
- [11] Hamamatsu PMT Handbook. <http://www.hamamatsu.com/>.
- [12] W. R. Leo. Techniques for nuclear and particle physics experiments: A how-to approach. 1st ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1994.
- [13] I. Afek et al. Quantum state measurements using multipixel photon detectors. PHYSICAL REVIEW A 79, 2009.
- [14] Kuraray Company. <http://www.kuraray.co.jp/en>.
- [15] R. Brun and F. Rademakers. Root an object oriented data analysis 171 framework. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 173 vol. 389, no. 12, pp. 81 – 86, 1997.
- [16] O. Soto et al. Nuclear instruments & methods in physics research a (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.06.071>.

Apéndice

Apéndice A

Cabecera de archivo guardado por el programa de adquisición.

	<i>#PMT</i>	<i>ch1</i> <i>ch11</i>	<i>ch2</i> <i>ch12</i>	<i>ch3</i> <i>ch13</i>	<i>ch4</i> <i>ch14</i>	<i>ch5</i> <i>ch15</i>	<i>ch6</i> <i>ch16</i>	<i>ch7</i>	<i>ch8</i>	<i>ch9</i>	<i>ch10</i>
1											
2	272	351	460	315	310	258	133	302	254	364	305
		242	187	283	302	436	126				
3	211	376	269	393	244	277	96	265	604	507	240
		218	107	215	244	159	359				
4	236	262	266	240	269	114	213	612	542	319	410
		215	158	350	316	215	346				
5	207	483	438	184	363	168	192	242	228	299	364
		335	90	260	131	209	185				
6	185	339	139	325	302	291	93	379	184	318	183
		394	87	389	181	268	104				
7	208	493	379	415	578	228	153	460	350	492	445
		139	92	334	256	325	242				
8	233	267	300	400	150	357	199	584	463	305	389
		284	155	244	260	561	376				
9	233	272	448	362	179	338	229	414	513	387	262
		478	224	475	298	285	342				
10	239	223	283	190	160	252	405	233	233	323	369
		288	281	344	204	498	189				
11	224	340	363	255	368	245	185	333	394	184	275
		346	290	341	731	170	259				
12	214	410	285	305	307	195	412	188	460	327	562
		296	111	356	269	376	314				
13	243	279	222	129	244	385	402	183	310	427	475
		107	475	284	275	554	130				
14	301	340	227	252	354	429	359	240	481	463	334
		236	108	408	297	360	459				

Apéndice B

Script para medición 1

```
1 #####
2 #           MPPC measure
3 #           script by Rinsky Rojas
4 #           rimsky@gmail.com
5 #####
6 # program to measure mppc in stage 2
7 #####
8 DIR=/lustre/user/mppc/PDE/data
9 DATA=${DIR}/${1}
10 #data file
11 mppc=${1}
12 IDrun=14
13
14 if [ ! -d $DATA ]; then
15     mkdir $DATA
16     chmod 775 $DATA
17     if [ $? -eq 0 ]; then
18         echo -e "Folder succefully created: $DATA"
19     else
20         echo -e "\e[0;31mERROR:\e[0m folder canot be created: $DATA"
21         exit 1
22     fi
23 else
24     echo "eureka, folder ya existe"
25 fi
26
27
28 #para las distintas cajas seleccionar MPPC_data_*.txt correcto
29 volt='less MPPC_data_all.txt | grep -A 15 $1 | awk 'NR==1 {printf "(%s +", $3 }; NR
    >1&& NR<16 {printf "%s +", $2} NR ==16{printf "%s)/16.0 \n", $2 }'| sed 's/,./g' | bc
    -l | awk '{printf "%.2f\n", $1}''
30 rm $DATA/logfile_mppc_${1}'_'.txt
31 rm $DATA/IDrun_${IDrun}'_'*
32 ./measure2.sh $1 $volt $IDrun | tee -a $DATA/logfile_mppc_${1}'_'.txt
33 grep -v elapsed $DATA/logfile_mppc_${1}'_'.txt > $DATA/logfile_mppc_${1}'_'.nocounts.txt
34 grep -v Progress $DATA/logfile_mppc_${1}'_'.nocounts.txt > $DATA/logfile_${IDrun}'_'
    mppc_${1}'_'.clean.txt
```

```

35 rm $DATA/logfile_mppc_$1'_'_'.txt $DATA/logfile_mppc_$1'_'_'.nocounts.txt
36 grep -B 28 -in error $DATA/logfile_$IDrun'_'_'.clean.txt | grep measurement
37 grep -in error $DATA/logfile_$IDrun'_'_'.clean.txt
38 chmod 775 $DATA/logfile_$IDrun'_'_'.clean.txt
39 # para medir timing
40 #opVolt='echo "$volt + 0.4" | bc'
41 #./DBtiming.sh $mppc $opVolt
42 #./fit/32_fitall $mppc $IDrun $volt 1
43 #echo -e \n Si PDE es cero o es mayor a 0.5, TOMA NOTA. Probablemente hay un problema.
    Sigue con otro MPPC.

```

Apéndice C

Script para medición 2

```
1  #!/bin/bash
2  # Simple script to measure MPPC
3  #
4  #          by Rimsky Rojas rimsky@gmail.com
5  #
6  clear
7  #voltage steps
8  steps=0.1
9  range=0.2
10 initial_delay=240
11 delay=120
12 measures=9
13 Nmed=1
14 voltage=0.0
15 events=50000
16 pedevents=50000
17 ledvoltage=4.7
18 DIR=/lustre/user/mppc/PDE/data
19 DATA=${DIR}/${1}
20 #OJO la carpeta se crea en el script DBmeasure2.sh
21 #data file
22 mppc=$1
23 voltage=$2
24 Ntest=$3
25 uPeriod=120
26
27
28
29 function Measure {
30     for i in $(seq 1 $measures); do
31         echo -e "\n\nmeasurement number \"$i\" of voltage \"$voltage`\n'
32         ~/controllers/kpulse/kPulse -d 400 -p 1
33         ~/controllers/ksm/ksm -v $voltage -p 1
34         while [ ! -e $DATA/IDrun_$Ntest_"mppc.$mppc"_"$voltage"_"ped.dat ]
35             do
36                 ~/controllers/VMEQDC/QDCread $pedevents $DATA/IDrun_$Ntest_"
37                     mppc.$mppc"_"$voltage"_"ped.dat $delay
```

```

37         done
38         ~/controllers/kpulse/kPulse -d 0 -p 1
39         while [ ! -e $DATA/IDrun.$Ntest"_mppc.$mppc"_"$voltage.dat ]
40         do
41             ~/controllers/VMEQDC/QDCread $events $DATA/IDrun.$Ntest"_
42                 mppc.$mppc"_"$voltage.dat 10
43         done
44         ~/controllers/misc/misc -q -t
45         voltage='echo $voltage + $steps|bc '
46     done
47 }
48
49 echo -e "MPPC measure\nscript by Rimsky Rojas rimsky@gmail.com"
50 echo -e "\nstarting measurements of mppc "$mppc" op. voltage "$voltage '\n'
51 date -R
52 echo -e "\n"
53 ~/controllers/kpulse/kPulse -f $uPeriod -d 400 -t 0 -v $ledvolt -p 1
54 ~/controllers/ksm/ksm -v $voltage -p 1
55 sleep $initial_delay 's'
56 voltage='echo ${voltage} - $range|bc '
57 Measure
58 ~/controllers/kpulse/kPulse -p 0
59 ~/controllers/ksm/ksm -p 0
60 ~/controllers/misc/misc -d
61 echo -e "\n"
62 date -R
63 echo -e "\n"

```