



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CALIBRACIÓN DE LOS TUBOS  
FOTOMULTPLICADORES DEL OBSERVATORIO  
HAWC DE RAYOS GAMMA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**FÍSICO**

**P R E S E N T A:**

**PABLO VANEGAS ANGUIANO**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ANDRÉS SANDOVAL ESPINOSA  
2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## Hoja de datos de jurado

1. Datos del alumno  
Vanegas  
Anguiano  
Pablo  
55 48 22 89  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
301147990
2. Datos del tutor  
Dr.  
Andrés  
Sandoval  
Espinosa
3. Datos del sinodal 1  
Dr.  
Alejandro  
Lara  
Sánchez
4. Datos del sinodal 2  
Fis  
Arturo Ismael  
Iriarte  
Valverde
5. Datos del sinodal 3  
Dr.  
José Rubén  
Alfaro  
Molina
6. Datos del sinodal 4  
Dr.  
José Ignacio  
Cabrerera  
Martínez
7. Datos del trabajo escrito  
Calibración de los tubos fotomultiplicadores del Observatorio HAWC de Rayos Gamma.  
75p  
2013

---

# Índice General

---

## Capítulo I

El Observatorio HAWC de rayos gamma .....	1
1.1 HAWC .....	1
1.2 Ubicación .....	3
1.3 Los detectores .....	4
1.4 Principio de detección.....	6
1.4.1 Cascadas Atmosfericas .....	8
1.4.2 Radiación Cherenkov.....	8
1.5 Principales objetivos de HAWC.....	10
1.5 Objetivo de la tesis .....	10

## Capítulo II

Los Tubos Fotomultiplicadores .....	12
2.1 Tubo fotomultiplicador.....	13
2.2 Principio básico .....	13
2.3 El fotocátodo.....	15
2.3.1 Materiales del fotocátodo .....	19
2.4 Ventana de entrada .....	22
2.5 Electrodo de enfoque .....	25
2.6 Dinodos .....	26
2.4.1 Geometría de los dinodos.....	28
2.5 Ánodos .....	35
2.6 Base divisora de voltaje.....	35
2.7 Características de los PMT's.....	36
2.7.1 Tiempo de respuesta.....	36
2.7.2 Linealidad.....	36
2.7.3 Uniformidad .....	37
2.7.4 Corriente oscura.....	37

2.8 El PMT R5912.....	38
2.8.1 Características generales .....	38

### Capítulo III

Sistema automatizado para la calibración de los PMT's. ....	42
3.1 Objetivo .....	42
3.2 Sistema de posicionamiento del LED .....	43
3.3 Gabinete .....	44
3.4 Robot.....	46
3.4.1 Sistema de movimiento azimutal .....	46
3.4.2 Sistema de movimiento vertical.....	47
3.5 Control del movimiento.....	48
3.5.1 Tarjeta de control.....	49
3.5.2 Software de control.....	50
3.6 Recorrido del LED.....	52

### Capítulo IV

Calibración.....	54
4.1 Objetivo .....	54
4.3 Sensibilidad del fotocátodo. ....	58
4.4 Foelectrón único. ....	63
4.5 Ganancia .....	64

### Capítulo V

Conclusiones.....	72
-------------------	----

Bibliografía.....	74
-------------------	----

---

# Índice de figuras

---

Figura 1. 1 Vista panorámica de HAWC.....	2
Figura 1. 2 Tanques cilíndricos colocados en Sierra Negra, Puebla. ....	5
Figura 1. 3 Simulación de los 300 detectores y una imagen satelital del avance de la construcción de los tanques.....	5
Figura 1. 4 Simulación de la producción de la cascada generada por un rayo gamma proveniente del espacio al entrar en la atmósfera terrestre. ....	6
Figura 1. 5 Frente de onda generado por el paso de una partícula cargada cuando su velocidad es mayor que la de la luz. ....	9
Figura 1. 6 Simulación de la luz Cherenkov al llegar a los 4 PMTs del tanque. ....	9
Figura 2. 1 Diagrama típico de las partes que componen a un tubo fotomultiplicador. ....	14
Figura 2. 2 Diferentes tipos de PMTs de la marca Hamamatsu.....	15
Figura 2. 3 Representación del modelo de bandas. ....	16
Figura 2. 4 Curva de la eficiencia cuántica y sensibilidad radiante en función de la longitud de onda. ....	18
Figura 2. 5 Fotocátodos de reflexión y fotocátodos de transmisión. ....	19
Figura 2. 6 Transmitancia de los tipos de vidrio a diferentes longitudes de onda. ....	24
Figura 2. 7 Trayectoria que siguen los electrones bajo el campo eléctrico producido por electrodos de enfoque.....	25
Figura 2. 8 Cascada de electrones secundarios.....	26
Figura 2. 9 Grafica de la energía del electrón primario vs el coeficiente de emisión secundaria para materiales fotoemisivos.....	28
Figura 2. 10 Diagrama de la configuración Box and grid.....	29
Figura 2. 11 Diagrama de la configuración circular-cage. ....	30
Figura 2. 12 Diagrama de la configuración Linear focoused. ....	31
Figura 2. 13 Diagrama de la configuración Venetian blind. ....	32
Figura 2. 14 Diagrama de la configuración Microchannel plate.....	32
Figura 2. 15 Diagrama de configuración de Mesh. ....	33
Figura 2. 16 Diagrama de la configuración Metal Channel dinodo.....	34
Figura 2. 17 Diagrama de la configuración de la combinación de dinodos de <i>Box and grid</i> y <i>linear focoused</i> .....	34
Figura 2. 18 Diagrama de la base divisora de voltaje para el PMT R5912 de Hamamatsu.....	36
Figura 2. 21 Curva de sensibilidad radiante y la eficiencia cuántica para los PMTs R5912 y R7081.....	39
Figura 2. 19 Diagrama dimensional del PMT R5912 y la configuración de dinodos box and grid-linear focoused. ....	40
Figura 2. 20 Diagrama dimensional del PMT R7081.....	40

Figura 2. 22 Imágenes del PMT con su base de plástico y del circuito divisor de voltaje. ....	41
Figura 3. 1 Superficie semiesférica del PMT R5912.....	43
Figura 3. 2 Sistema automatizado para la calibración .....	44
Figura 3. 3 Diagrama de las piezas del robot. ....	45
Figura 3. 4 Sistema de movimiento azimutal.....	47
Figura 3. 5 Sistema de movimiento vertical .....	48
Figura 3. 6 Tarjeta de control.....	49
Figura 3. 7 Ventana de configuración de los motores.....	50
Figura 3. 8 Ventana de calibración.....	52
Figura 3. 9 Puntos de medición y recorrido que sigue el LED. ....	53
Figura 4. 1 Comparación de los pulsos de dos PMT's .....	55
Figura 4. 2 Diagrama del dispositivo experimental para la calibración de los PMT's.....	56
Figura 4. 3 Imagen del dispositivo experimental en el laboratorio del Instituto de Física de la UNAM. ....	58
Figura 4. 4 Líneas de recorrido del LED y orientación del PMT al momento de la medición.....	59
Figura 4. 5 Gráfica del promedio de la carga obtenida por el QDC en función de la posición de la incidencia de fotones sobre el PMT 560. ....	60
Figura 4. 6 Mapa de sensibilidad sobre la superficie del fotocátodo. ....	61
Figura 4. 7 Mapa de la sensibilidad del PMT 560 rotado 180° con respecto a su posición inicial.....	61
Figura 4. 8 Mapa de la sensibilidad de distintos PMT's .....	62
Figura 4. 9 Mapa de la sensibilidad de los PMT's 586 y 911 en donde vemos que presentan una región de sensibilidad mínima muy grande.....	63
Figura 4. 10 Espectro típico de un fotoelectrón.....	64
Figura 4. 11 Espectro encontrado para un fotoelectrón. ....	65
Figura 4. 12 Espectro del fotoelectrón para 1800, 1700, 1600 y 1500V.....	65
Figura 4. 13 Ajuste de los perfiles para 1800 y 1750V.....	67
Figura 4. 14 Ajuste de los perfiles para 1700 y 1650V.....	67
Figura 4. 15 Ajuste de los perfiles para 1600 y 1550V.....	67
Figura 4. 16 Ajuste de los perfiles para 1500 y 1450V.....	68
Figura 4. 17 Ajuste de los perfiles para 1400 y 1350V.....	68
Figura 4. 18 Curva de la ganancia en función del alto voltaje aplicado al PMT 568.....	70
Figura 4. 19 Curva de ganancia para 7 PMT's .....	70

# Capítulo I

---

## El Observatorio HAWC de rayos gamma

---

### 1.1 HAWC

HAWC es un observatorio detector de rayos gamma de muy alta energía (por sus siglas en inglés High Altitude Water Cherenkov, en español significa Observatorio Cherenkov en Agua a Gran Altura), que detecta rayos gamma en un rango de energías de 100GeV a 100TeV, basándose en la detección de luz Cherenkov en agua producida por cascadas atmosféricas de partículas.



HAWC es la segunda generación en observatorios de este tipo; su funcionamiento se basa en la experiencia y en la tecnología que anteriormente usó el Observatorio MILAGRO<sup>1</sup>.

En comparación con el Observatorio MILAGRO, HAWC presenta mejoras en el diseño: como el aumento de altitud –de 2630m a 4100m sobre el nivel del mar– y una mayor área de detección –de 4800m<sup>2</sup> a 22500m<sup>2</sup>–, así como el aislamiento óptico de los tubos fotomultiplicadores en cada detector, con todo esto se logrará una sensibilidad de rayos gamma 15 veces mayor que su antecesor.



**Figura 1. 1** Vista panorámica de HAWC. Gracias a sus características este observatorio será el detector más sensible de rayos gamma de alta energía en el mundo.

Los rayos gamma son un tipo de luz –millones de veces más energética que la luz visible– sólo es producida en el universo por fenómenos muy violentos, por ejemplo: las explosiones de supernovas, centros activos de galaxias, pulsares, destellos de rayos gamma GRB´s (por sus siglas en ingles Gamma Ray Burst) galácticos y extragalacticos.

---

<sup>1</sup> MILAGRO fue un observatorio de rayos gamma de alta energía que se

Una de las grandes ventajas de HAWC es la continua observación del cielo las 24 horas del día, los 365 días del año; sin importar las condiciones meteorológicas del lugar ni la estación en que se encuentre y mucho menos si es de día o de noche. Los rayos gamma serán detectados en un cono de  $45^\circ$  respecto al cenit logrando que durante un día se logre observar el 66% de la bóveda celeste.

## 1.2 Ubicación

HAWC se encuentra en el estado de Puebla, México dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba –figura 1.1- a una altura de 4100 metros sobre el nivel del mar, en una meseta en las faldas del Volcán Sierra Negra con latitud  $18^\circ 59' 41''$  Norte y longitud de  $97^\circ 18' 28''$  Oeste

Dentro de este Parque también está ubicado el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) por lo que se aprovecha su infraestructura: camino de acceso, energía eléctrica, internet y fibra óptica.

Debido a la latitud de HAWC, este tendrá una visibilidad de la esfera celeste 15% mayor en comparación con el Observatorio MILAGRO e igualmente gracias a esto el observatorio se podrá calibrar diariamente ya que a  $3^\circ$  del cenit pasa la nebulosa del cangrejo que es un remanente de supernova y emite rayos gamma.

A pesar de la altitud el clima no es extremo, esto se debe a la cercanía con el Ecuador; las temperaturas generalmente se encuentran entre  $0^\circ\text{C}$  y  $8^\circ\text{C}$  registrando una temperatura promedio de  $4.3^\circ\text{C}$  con pocas nevadas durante el año, lo cual evita el congelamiento del agua de los detectores.

### 1.3 Los detectores

El Observatorio HAWC consiste en un arreglo de 300 detectores de luz Cherenkov en agua, distribuidos en una área de 22500m<sup>2</sup>; cada uno está compuesto por un tanque cilíndrico de acero galvanizado y corrugado con un diámetro de 7.3m y 5m de alto –figura 1.2- un *Bladder* –bolsa negra de policloruro de vinilo (PVC XR3 PW) de .015” de espesor– y cuatro tubos fotomultiplicadores PMTs (por sus siglas en inglés Photomultiplier Tubes).

El *Bladder* (bolsa) almacena 200m<sup>3</sup> de agua cristalina y purificada y protegerá a los PMT’s de cualquier fuente de luz externa, quedando el interior del tanque completamente oscuro. Se utiliza también una estructura de metal cubierta por una lona formando un domo –tapa– sobre el tanque para proteger el *Bladder* y evitar que se acumule agua o nieve sobre el tanque.

El total de tubos fotomultiplicadores será de 1200, de la marca Hamamatsu Photonics<sup>2</sup>, de estos 900 son del modelo R5912 con un diámetro en su superficie de 20 centímetros --anteriormente utilizados en el Observatorio MILAGRO-- y los 300 restantes son modelo R7081 de 25 centímetros de diámetro, adquiridos para HAWC.

Por cada tanque se colocaran cuatro PMTs todos anclados en el fondo del tanque con el fotocátodo mirando hacia arriba. Un PMT de 25cm estará en el centro del tanque y los tres restantes serán los de 20cm que rodearan al PMT central formando un triángulo entre ellos; cada detector será conectado e instrumentado un sistema y electrónica

---

<sup>2</sup> Fabrica japonesa dedicada a la fabricación de sensores ópticos.

de adquisición central --gran parte de ésta electrónica también se utilizo en el Observatorio MILAGRO--.



**Figura 1. 2** Imagen de los tanques cilíndricos colocados en Sierra Negra, Puebla.

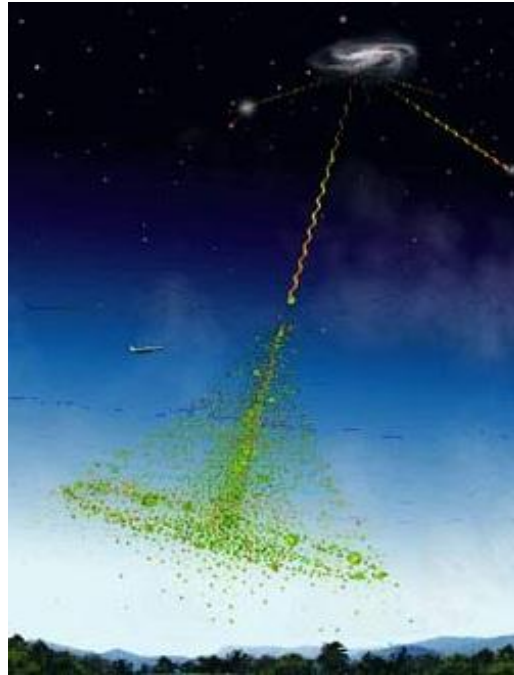
En la -figura 1.3- se presenta una simulación de como se distribuirán los 300 detectores y una foto satelital del avance de la construcción de 43 tanques.



**Figura 1. 3** A la izquierda se presenta la simulación de los 300 detectores. A la derecha se presenta una imagen satelital del avance de la construcción de los tanques.

## 1.4 Principio de detección

Cuando un rayo gamma de alta energía atraviesa el espacio y llega a la Tierra, interacciona con las partículas de la atmósfera produciendo una cascada de partículas; éstas se expanden formando un frente de onda con una superficie curva y un centro de cascada ver (figura 1.4). Si la energía de los rayos gamma es lo suficientemente alta, estas partículas llegarán a los detectores en diferentes posiciones y tiempos: al entrar en contacto con el agua de los tanques producirán luz Cherenkov que iluminará los tubos fotomultiplicadores.



**Figura 1. 4** Simulación de la producción de la cascada generada por un rayo gamma proveniente del espacio al entrar en la atmósfera terrestre.

Al ser iluminados varios tanques con la misma cascada es posible reconstruir el frente de la cascada y por lo tanto la dirección del rayo gamma original y determinar las coordenadas de la posible fuente que lo originó en el universo; así el patrón de tiempo nos definirá la

dirección perpendicular de la superficie de la curva y la distribución de la luz Cherenkov con el arreglo de tanques determinará la posición del centro de la cascada.

Los rayos cósmicos cargados también producen cascadas al interactuar con la atmósfera; a diferencia de las cascadas de rayos gamma, las primeras contienen muones.

Debido a la altura a la que se encuentra HAWC será posible reducir la energía mínima de detección de rayos gamma y se podrán detectar más partículas de la cascada; el incremento de la superficie de detección se verá reflejado en una mejor resolución angular y se podrá determinar mejor la curvatura del frente de la cascada localizando mejor su centro para discriminar las cascadas de rayos cósmicos aumentando la probabilidad de detectar mayor cantidad de muones.

Con el aislamiento óptico de los PMT's en cada tanque se disminuirá el número de tubos fotomultiplicadores disparados por partículas que lleguen horizontalmente al detector, lo que permitirá mejorar la capacidad de rechazo del ruido de fondo. Además la profundidad de 5m en los tanques permitirá que algunas partículas que entran al agua conviertan su energía en luz Cherenkov.

El objetivo principal consistirá en medir el tiempo de llegada y el tiempo de umbral de los pulsos en cada PMT con lo cual se tendrá información para la reconstrucción de la posición del centro de la cascada, la dirección y la energía de la partícula primaria.

### 1.4.1 Cascadas Atmosféricas

Un rayo cósmico primario de alta energía al interactuar con las partículas de la atmósfera terrestre pierde parte de su energía y al entrar en contacto con estas partículas generan otras que interactuarán de nuevo hasta perder su energía generando una reacción en cadena entre las partículas; a este proceso se le llama Cascada Atmosférica Extensa (EAS Extensive Air Shower)

A medida que se forma la cascada las partículas se dispersan alejándose del eje del rayo incidente primario haciendo que sea posible su detección.

Las cascadas producidas por un rayo gamma primario producen un par electrón-positrón de alta energía que a su vez produce más fotones por Bremsstrahlung --radiación de frenado-- que a su vez produce más fotones y más pares, por el mismo efecto y así sucesivamente hasta que se termina su energía.

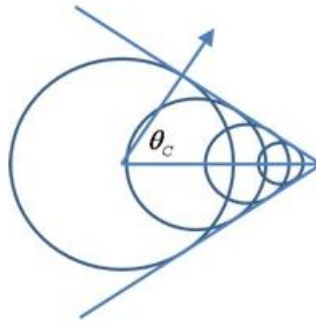
### 1.4.2 Radiación Cherenkov

Cuando la velocidad de una partícula es mayor que la velocidad de la luz en el medio en el que viaja, se genera una luz en el espectro ultravioleta formando un cono en la dirección de la partícula, esta luz es la llamada Luz Cherenkov.

El ángulo del cono de la partícula se puede determinar por la formula

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.1)$$

El ángulo depende del índice de refracción del medio ( $n$ ) y de la velocidad de la partícula ( $v$ ). Donde  $\beta = \frac{v}{c}$  y  $c$  la velocidad de la luz.

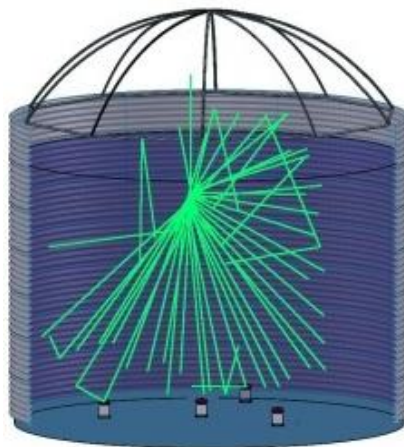


**Figura 1. 5** Frente de onda generado por el paso de una partícula cargada cuando su velocidad es mayor que la de la luz.

Para el agua tenemos  $n=1.33$  con lo que el ángulo está dado:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1}{1.33} = 41.2^\circ$$

Siendo de  $41.2^\circ$  el ángulo del cono producido en el agua. Con lo que la mayoría de las partículas cargadas serán observadas por al menos uno de los cuatro PMT's de cada tanque –figura 1.6-.



**Figura 1. 6** Simulación de la luz Cherenkov al llegar a los 4 PMTs del tanque.



## 1.5 Principales objetivos de HAWC

Entre los principales objetivos de HAWC se encuentran:

- Observar el cielo de rayos gamma de alta energía en TeV.
- Elaborar un mapa de la emisión difusa de rayos gamma de muy alta energía.
- Determinar el espectro de los rayos gamma de muy alta energía de fuentes astrofísicas dentro de la galaxia, para determinar si son o no fuentes de rayos cósmicos galácticos.
- Monitorear fuentes conocidas y descubrir nuevas fuentes de emisión difusa y puntual de rayos gamma de muy alta energía.
- Detectar la emisión de rayos gamma de muy alta energía.
- Aumentar la comprensión de los fenómenos que generan rayos gamma de muy alta energía.

## 1.5 Objetivo de la tesis

Una de las componentes del detector son los tubos fotomultiplicadores; éstos son los encargados de detectar la Luz Cherenkov producida por las partículas de la cascada atmosférica al entrar en contacto con el agua de los tanques.

Como se mencionó anteriormente, los 900 PMT's R5912 que se utilizaran en HAWC ya se utilizaron por el Observatorio MILAGRO y por lo tanto es necesario conocer su rendimiento actual para descartar PMT's que se encuentren dañados y calibrar los 900 PMT's para que dada una misma señal de entrada todos los PMT's que componen el

arreglo de HAWC tengan la misma ganancia, esto se logra encontrando el voltaje de operación para cada uno de ellos.

Para la calibración se diseñó y fabricó un sistema automatizado que permitiera posicionar un LED (por sus siglas en inglés Light Emitting Diode) sobre toda la superficie del PMT de manera precisa para poder medir la ganancia y así determinar el voltaje de operación. Además de permitiera reducir el tiempo de medición de cada PMT y disminuir las incertidumbres durante la toma de datos.

## **Capítulo II**

---

# **Los Tubos Fotomultiplicadores**

---

En este capítulo se presenta la descripción del funcionamiento de un tubo fotomultiplicador (PMT), las partes que lo componen, sus características y los distintos diseños.

Al final se mencionan las características del PMT R5912, de la marca Hamamatsu Photonics empleados en los detectores del Observatorio HAWC.

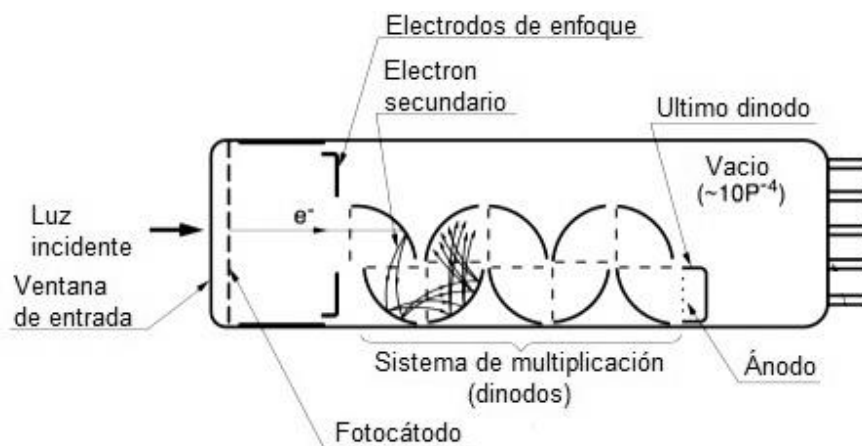
## 2.1 Tubo fotomultiplicador

Un tubo fotomultiplicador (PMT) es un dispositivo de detección de luz –que convierte la luz que incide sobre su superficie en una corriente eléctrica medible–; es un dispositivo muy sensible en las regiones ultravioleta, visible y cercano infrarrojo del espectro electromagnético siendo capaz de multiplicar la corriente producida por la luz incidente en un factor de  $10^3$  hasta  $10^9$ , también puede percibir eventos de un solo fotoelectrón.

## 2.2 Principio básico de funcionamiento.

El PMT consiste principalmente en un tubo de vidrio sellado con vacío en su interior, una ventana de entrada semitransparente, un cátodo fotosensible (fotocátodo), electrodos de enfoque, un sistema de multiplicación (dinodos) y un ánodo. El diagrama típico de un tubo fotomultiplicador se muestra en la figura 2.1.

Al incidir un fotón por la ventana de entrada, éste llega al fotocátodo que es el encargado de convertir al fotón incidente en un fotoelectrón por medio de efecto fotoeléctrico, el fotoelectrón emitido es acelerado y enfocado por el sistema de enfoque mediante un campo eléctrico hacia el primer dinodo del sistema de multiplicación que mediante el proceso de emisión secundaria de electrones se encarga de multiplicar a los fotoelectrones, este proceso se repite en cada uno de los dinodos hasta llegar al ánodo que es el que finalmente recoge todos los electrones para convertirlos en una señal eléctrica de salida.



**Figura 2. 1** Diagrama típico de las partes que componen a un tubo fotomultiplicador.

Existen varios tipos de tubos fotomultiplicadores entre los más comunes se encuentran el llamado “Tipo frontal” debido a que su ventana de entrada se encuentra en la parte superior por lo que los fotones entran directo hacia los dinodos; otro es el “tipo lateral” en el que su ventana de entrada se encuentra en un costado.

En la figura 2.2 se presentan PMT's de varios tamaños y formas todos de la marca Hamamatsu, cada uno está diseñado con diferentes características de acuerdo a la aplicación requerida.

El funcionamiento del PMT se basa en dos mecanismos físicos: el efecto fotoeléctrico que tiene lugar en el fotocátodo y la emisión secundaria de electrones que tiene lugar en los dinodos.



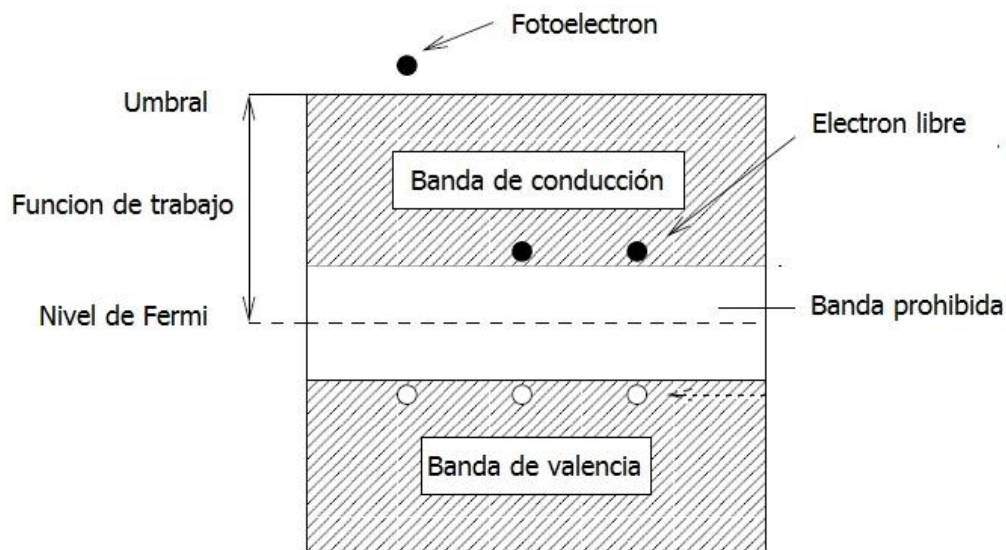
**Figura 2. 2** Diferentes tipos de PMT's de la marca Hamamatsu.

## 2.3 El fotocátodo.

El fotocátodo está hecho de un material semiconductor que convierte la energía de los fotones que inciden sobre él en electrones, normalmente conocidos por el nombre de fotoelectrones, pues su origen es por efecto fotoeléctrico: este fenómeno se puede explicar por el modelo de bandas.

El modelo de bandas se compone de tres regiones, la banda de valencia, la banda prohibida y la banda de conducción como se muestra en la figura 2.3.

En un material semiconductor, la banda prohibida es muy pequeña dejando a la de valencia y a la de conducción muy cercanas una de la otra, permitiendo el intercambio de electrones fácilmente.



**Figura 2. 3** Representación del modelo de bandas.

La banda de valencia es ocupada por los electrones que se encuentran en el último nivel energético de los átomos, estos electrones son llamados de valencia y son los que forman los enlaces entre los átomos.

La banda de conducción está ocupada por electrones libres que pueden moverse fácilmente, mientras que la banda prohibida no tiene niveles de energía disponibles para los electrones.

Cuando los electrones de la banda de valencia absorben la energía de los fotones y adquieren suficiente energía son emitidos hacia la banda de conducción con energía  $E = h\nu - \phi$ , en donde "h" es la constante de Plank, "v" la frecuencia de la luz incidente y  $\phi$  la función de trabajo; sólo los electrones que cuentan con energía superior al valor umbral de la función de trabajo  $\phi$  pueden causar la emisión de fotoelectrones. Cada fotón incidente transfiere su energía a un electrón y para que sea superior al valor umbral depende de la longitud de onda de la luz incidente y del material del que está hecho el fotocátodo.

La relación entre el fotocátodo y la longitud de onda de la luz incidente es conocida como "característica de respuesta espectral" y se expresa en términos de eficiencia cuántica y sensibilidad radiante.

La eficiencia cuántica (EC) se define como "el número de fotoelectrones emitidos desde el fotocátodo entre el número de fotones incidentes" y se expresa generalmente como un porcentaje por la ecuación 2.1

$$EC = \frac{\#fotoelectrones}{\#fotones} \times 100\% \quad (2.1)$$

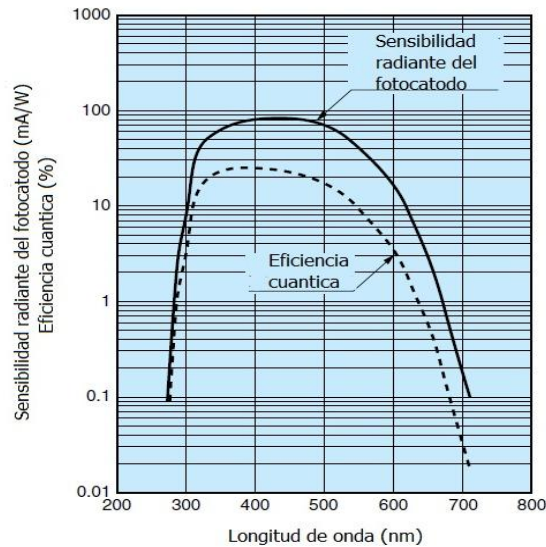
La sensibilidad radiante (S) es definida como "la corriente fotoeléctrica generada por el fotocátodo dividida por el flujo de la radiación incidente a una longitud de onda dada" y se expresa en unidades de Ampere/watts como en la ecuación 2.2

$$S = \frac{\text{corriente fotoelectrica} \left(\frac{A}{W}\right)}{\text{energia radiante de luz} \left(\frac{A}{W}\right)} \quad (2.2)$$

La figura 2.4 muestra la grafica de la eficiencia cuántica como función de la longitud de onda, así como la de la sensibilidad radiante para fotocátodos de Bialkali (ver sección 2.3.1).

La eficiencia cuántica es muy baja, por lo general logra alcanzar el 20%, es tan pequeña porque sólo una porción de la luz incidente es absorbida por el fotocátodo debido a las pérdidas de fotones por transmisión o reflexión y también por la pérdida de energía de los electrones al colisionar internamente con otros electrones del semiconductor o porque la barrera de potencial impide la fuga de algunos electrones.



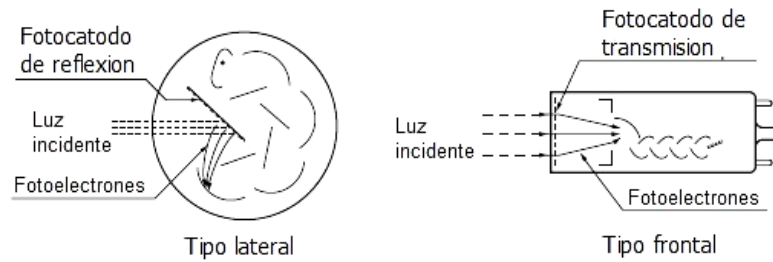


**Figura 2. 4** Curva de la eficiencia cuántica y sensibilidad radiante en función de la longitud de onda.

Los fotocátodos se pueden clasificar en dos tipos de acuerdo al proceso en el que emiten electrones:

- 1.- Modo de reflexión: el fotocátodo se deposita sobre una placa de metal y los fotoelectrones se emiten en dirección opuesta a la luz incidente.
- 2.- Modo de transmisión: el fotocátodo se deposita normalmente como una película delgada sobre el vidrio de la ventana de entrada, este fotocátodo es ópticamente transparente y los electrones son emitidos en la misma dirección que la luz incidente.

En la figura 2.5 se muestra un diagrama de ambas clasificaciones.



**Figura 2. 5** Fotocátodos de reflexión y fotocátodos de transmisión.

### 2.3.1 Materiales del fotocátodo

Los fotocátodos están fabricados generalmente de metales alcalinos ya que este tipo de metales tienen funciones de trabajo muy bajas. Los materiales que más comúnmente son utilizados para su fabricación son aleaciones entre los que destacan los siguientes:

#### **Ag-O-Cs (plata-oxígeno-cesio)**

El primer fotocátodo comercial que se fabricó fue de esta aleación; se puede utilizar en fotocátodos de transmisión y de reflexión.

Los de transmisión presentan una sensibilidad que va desde el visible hasta el infrarrojo de 300 a 1200nm mientras que el de reflexión es sensible en 300 a 1100nm, comparado con otros fotocátodos presenta una sensibilidad baja en el visible pero a cambio ofrece una muy buena sensibilidad en el infrarrojo por lo que es altamente recomendado para detección de infrarrojo.

#### **Ga-As-P (Galio-arsénico-fosforo)**

Se utiliza principalmente en fotocátodos de transmisión, este fotocátodo no tiene buena sensibilidad en la región ultravioleta, en

cambio ofrece una eficiencia cuántica muy alta en la región de luz visible de 400 a 700nm.

### **Ga-As (Galio-arsénico)**

Este tipo de aleación se puede utilizar en los dos tipos de fotocátodos:

A) El reflexivo tiene una buena sensibilidad en un amplio rango desde rayos ultravioleta hasta la región del infrarrojo, cerca de los 900nm y presenta una alta sensibilidad espectral entre los 300 a 850nm.

B) El tipo transmisión tienen un rango más estrecho en la respuesta espectral. La desventaja es que al exponerse a luz incidente con intensidad alta tiende a desgastarse rápidamente.

### **In-Ga-As (Indio-galio-arsénico)**

Este fotocátodo a diferencia del de Ga-As se le agrega el elemento Indio a su composición teniendo una respuesta espectral mayor a 800nm.

### **Sb-Cs (Antimonio-cesio)**

Tiene una respuesta espectral que va del ultravioleta al visible, se recomienda principalmente para aplicaciones en las que la intensidad de la luz es relativamente alta de manera que una gran corriente puede fluir en el cátodo. Es adecuado también para aplicaciones en las que se requiere enfriar el fotocátodo y se utiliza principalmente en fotocátodos de reflexión.

**Bialkali, (Sb-K-Cs, Sb-Rb-Cs)**

Se llama Bialkali porque está compuesto de dos tipos de metales alcalinos: antimonio-potasio-cesio y antimonio-rubidio-cesio. Se emplea en los dos tipos de fotocátodos: en el de transmisión presenta un rango de respuesta espectral similar al Sb-Cs, sin embargo tiene una sensibilidad más alta y una corriente oscura más baja (ver sección 2.7.4); es ampliamente usado en mediciones de radiación.

Los fotocátodos de reflexión ofrecen una mayor sensibilidad en la región ultravioleta.

**Bialkali de alta temperatura**

Con Sodio-potasio-antimonio. Éste presenta una respuesta espectral casi idéntica a los fotocátodos Bialkali aunque su sensibilidad es un poco inferior. Como su nombre lo indica este fotocátodo puede soportar temperaturas de hasta 175°C mientras que los fotocátodos normales están garantizados hasta 50°C.

Al utilizarlo a temperatura ambiente presenta una corriente oscura muy baja lo que lo hace útil para mediciones de luz donde se requiera contar un solo fotón.

Este fotocátodo se utiliza principalmente en pozos de petróleo donde los tubos son sometidos a altas temperaturas.

**Multiálcali (Na-K-Sb-Cs)**

Este es un fotocátodo que utiliza tres o más tipos de metales alcalinos como sodio-potasio-antimonio-cesio. Presenta una amplia respuesta espectral en ultravioleta, visible y cercanos al infrarrojo en 850nm, se emplea principalmente en espectrómetros de banda ancha.

**Ciego Solar (Cs-Te y Cs-I)**

Los fotocátodos de cesio-telurio y cesio-yodo son sensibles a los rayos UV lejanos, y a los rayos UV, sin embargo no son sensibles a la luz visible por eso se les conoce como ciego solar. Por ejemplo Cs-Te, es insensible a una longitud de onda superior a 320nm y el Cs-I a longitudes de onda superiores a 200nm

## 2.4 Ventana de entrada

La ventana de entrada es por donde entran los fotones hacia el fotocátodo. Por lo regular están fabricadas de vidrio; ya que la mayoría tienen un índice de refracción de 1.5 y una pérdida de reflexión de aproximadamente 4% en la superficie. En general el espesor que se utiliza para ventanas de PMT's pequeños es de 1mm y para PMT's grandes el espesor aumenta de 3 a 8mm para una mayor resistencia.

La transmitancia del vidrio varía con su espesor de acuerdo a la ecuación 2.3 en donde "K" es una constante para la mayoría de los vidrios con valor de .92, "α" es el coeficiente de absorción y "t" es el espesor del vidrio.

$$T = K10^{-\alpha t} \quad (2.3)$$

Los materiales más usados en la fabricación de las ventanas de entrada son:

### **Vidrio de Borosilicato**

El vidrio de Borosilicato también es conocido como Pyrex es el material que más se utiliza para la fabricación de las ventanas. Este vidrio tiene un índice de refracción de 1.5 y un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, por lo que resiste cambios bruscos de temperatura; es muy resistente a golpes y transmite longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

### **Vidrio Ultravioleta (UV glass)**

Como su nombre lo indica este vidrio es ideal para el paso de radiación ultravioleta. Su índice de refracción es de 1.49 y transmite longitudes de onda desde el infrarrojo hasta 190nm.

### **Sílice sintética**

La sílice sintética transmite la radiación ultravioleta desde el infrarrojo hasta 160nm. Su índice de refracción es de 1.47; se debe tener mucho cuidado al manipular este tipo de PMT's debido a que la estructura es muy frágil y puede romperse fácilmente.

### **Zafiro**

El zafiro está compuesto de cristales de  $Al_2O_3$ , tiene una transmitancia intermedia en la región ultravioleta entre el vidrio UV y

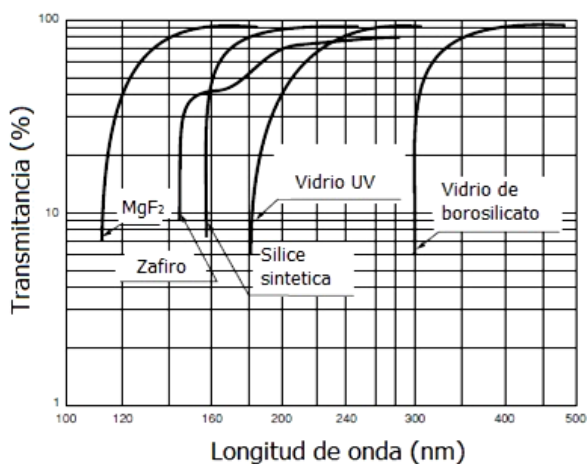
el sílice. Este vidrio transmite la radiación hasta 150nm su índice de refracción es de 1.8.

### **MgF<sub>2</sub> (fluoruro de magnesio)**

El fluoruro de magnesio es un cristal alcalino halogenuro por lo tanto lo convierte en un buen transmisor de radiación ultravioleta detectándola hasta 115nm, su índice de refracción es de 1.40.

Para longitudes de onda menores a 105nm, no hay material transparente, que permita su paso.

En la figura 2.6 se muestran la transmitancia de estos vidrios en un rango de longitudes de onda entre 100 y 500nm.

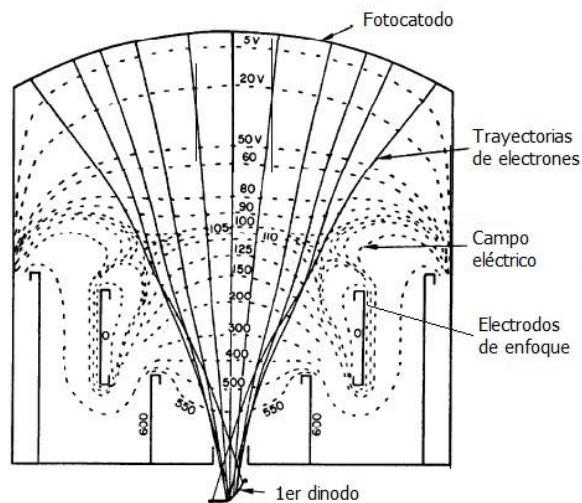


**Figura 2. 6** Transmitancia de los tipos de vidrio a diferentes longitudes de onda.

## 2.5 Electrodo de enfoque

Los electrodos de enfoque se encuentran entre el fotocátodo y el primer dinodo, éstos dirigen a los fotoelectrones emitidos por el fotocátodo hacia el primer dinodo por medio de un campo eléctrico; en la figura 2.7 se muestran el campo eléctrico por medio de líneas punteadas y las trayectorias que siguen los electrones emitidos desde diferentes partes del fotocátodo con líneas continuas dentro de un PMT.

La función del sistema de enfoque es recolectar la mayor cantidad de electrones para que lleguen al primer dinodo independientemente de su velocidad inicial sin importar en que parte del fotocátodo se originaron, por lo que el tiempo de tránsito de electrones entre el fotocátodo y el primer dinodo debe ser independiente de su velocidad inicial y del punto de origen.



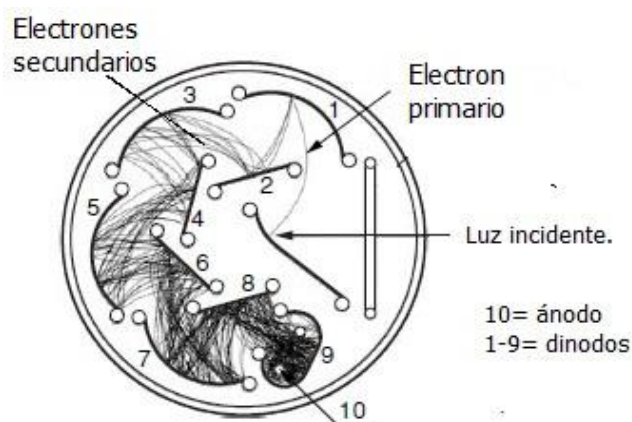
**Figura 2. 7** Trayectoria que siguen los electrones bajo el campo eléctrico producido por electrodos de enfoque. El campo magnético terrestre puede afectar el sistema de enfoque ocasionando que los electrones se desvíen y se reduzca la eficiencia.



Ahora bien, la eficiencia de recolección se define como “el número de electrones que llegan al primer dinodo, dividida, por el número de electrones que salen del fotocátodo”, ésta depende del voltaje aplicado entre el fotocátodo y el primer dinodo; generalmente la recolección es mayor a 80%.

## 2.6 Dinodos

El sistema de multiplicación o dinodos es la parte en donde se multiplican los electrones que salen del fotocátodo. Cuando estos electrones llegan con suficiente energía al primer dinodo y lo golpean, emiten más electrones llamados electrones secundarios que su vez se dirigirán al segundo dinodo que emitirá más electrones aumentando su número de dinodo a dinodo sucesivamente hasta llegar al último dinodo formando una cascada de electrones como se muestra en la figura 2.8 que incrementa en varios órdenes de magnitud, yendo desde 10 hasta  $10^9$  veces la carga inicial obtenida en el fotocátodo.



**Figura 2. 8** Cascada de electrones secundarios en un arreglo de 9 dinodos.

El sistema de multiplicación consiste en un arreglo de 8 a 19 etapas de dinodos configurados de tal manera que los electrones emitidos por cada dinodo lleguen lo más eficientemente posible al siguiente dinodo.

El proceso de emisión secundaria es muy similar al descrito anteriormente en la fotoemisión, a diferencia del anterior, el fotón incidente es sustituido por un electrón y el material usado es un metal conductor; cuando los electrones incidentes interactúan con los electrones en el material éstos los excitan a estados de energía más altos: los electrones excitados se mueven hacia la superficie y son emitidos. El número de electrones secundarios emitidos por el electrón primario se llama factor de emisión secundaria “ $\delta$ ” y depende de la energía del electrón incidente.

La ganancia  $g_i$  en cada dinodo está dada por la ecuación (2.4) en donde la eficiencia de recolección “ $\eta$ ” se multiplica por el factor de emisión secundaria “ $\delta$ ”, siendo “ $i$ ” el número de dinodo.

$$g_i = \delta_i \eta_i \quad (2.4)$$

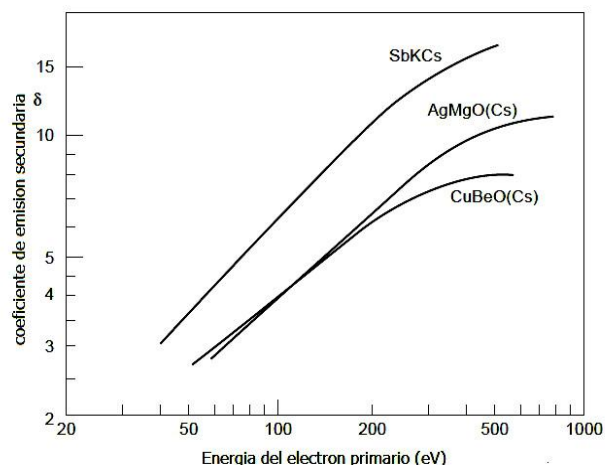
La ganancia total de todo el conjunto de dinodos es “ $G$ ”, en la ecuación (2.5) “ $N$ ” es el número total de dinodos

$$G = \prod_{i=1}^N g_i \quad (2.5)$$

Cabe destacar que la capacidad de arrancar electrones de los dinodos aumenta de manera exponencial conforme aumenta el alto voltaje (HV). Para un buen funcionamiento del PMT es importante que esté al vacío en su interior; en caso contrario los electrones arrancados podrían colisionar con las moléculas de aire en su interior y esto disminuiría su eficiencia.

Existen dos factores importantes que rigen la ganancia y el tiempo de la multiplicación de electrones en los dinodos, éstos son los materiales con los cuales están fabricados y su geometría.

Los materiales más utilizados para la fabricación de dinodos son: AgMgO, CuBeO, NiAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SbKCs los cuales tienen buen coeficiente de emisión secundaria. En -figura 2.9- se muestra la dependencia de tres materiales emisivos.



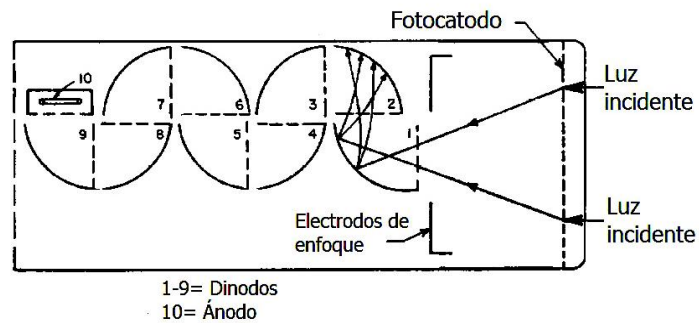
**Figura 2. 9** Grafica de la energía del electrón primario vs el coeficiente de emisión secundaria para materiales fotoemisivos.

### 2.4.1 Geometría de los dinodos

Una de las consideraciones fundamentales en el diseño de los tubos fotomultiplicadores es la configuración y posicionamiento de los dinodos -cada uno de ellos es configurado para que los electrones emitidos se dirijan al siguiente dinodo-. Existen diferentes tipos de configuraciones de dinodos con características específicas para diversas aplicaciones, entre las que destacan:

### Box and grid (caja y rejilla)

Esta es la configuración que más se emplea en tubos fotomultiplicadores debido a que cuentan con un área de entrada de electrones bastante grande logrando una alta eficiencia de recolección. El arreglo está formado por una sucesión de cuartas partes de dinodos cilíndricos como se muestra en la figura 2.10 se utilizan en PMT's de tipo frontal presentando una buena uniformidad (ver sección 2.7.3) a pesar de lo anterior el tiempo de respuesta (ver sección 2.7.1) entre los dinodos es lento pues tarda de 6 a 20ns. Tiene una linealidad (ver sección 2.7.2) de 1 a 10 mA y no se recomienda para campos magnéticos mayores a 0.1 microteslas.



**Figura 2. 10** Diagrama de la configuración Box and grid.

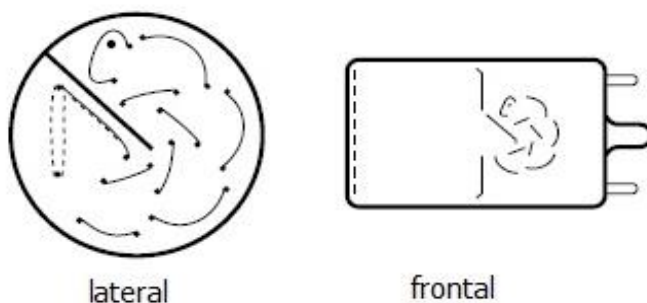
### Circular-cage (jaula circular)

Se caracteriza por ser un arreglo muy compacto, se utiliza principalmente en PMT's laterales, mas su empleo no se limita a éstos sino también a frontales. Los dinodos son curvos y están agrupados dentro de una circunferencia de metal -figura 2.11-.

Esta configuración cuenta con un tiempo de respuesta entre 0.9 y 3.0 ns debido al pequeño tamaño de la configuración, presenta una alta ganancia para voltajes bajos.

Su linealidad de pulso está entre 1 a 10 mA y cuenta con una uniformidad muy baja; su eficiencia de recolección es alta, y en campos magnéticos resiste hasta 0.1 mT.

Estos PMT's generalmente se utilizan en aplicaciones donde se necesita una alta sensibilidad pero el área del fotocátodo debe ser pequeña.

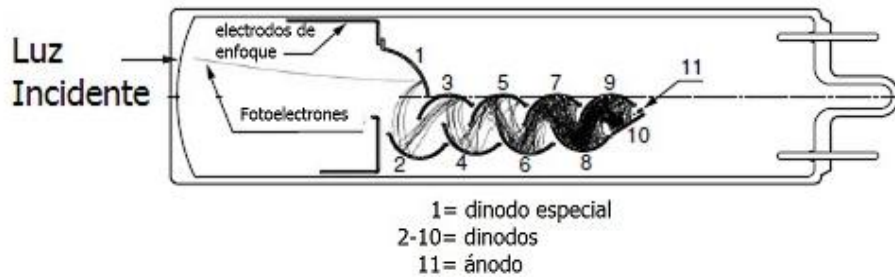


**Figura 2. 11** Diagrama de la configuración circular-cage.

### **Linear focoused (enfoque lineal)**

Esta configuración se utiliza principalmente en tubos fotomultiplicadores frontales y está diseñada para una alta eficiencia de recolección de electrones: el primer dinodo es más grande que el resto y distinto a los dinodos siguientes -figura 2.12-; primordialmente se emplea en aplicaciones que requieren un tiempo de respuesta alto.

El tiempo de respuesta va de 0.7 a 3.1ns, además presenta una linealidad de pulso de 10 a 250 mA. Tiene la ventaja de ofrecer una corriente de salida grande, no es inmune a los campos magnéticos mayores a 0.1mT.

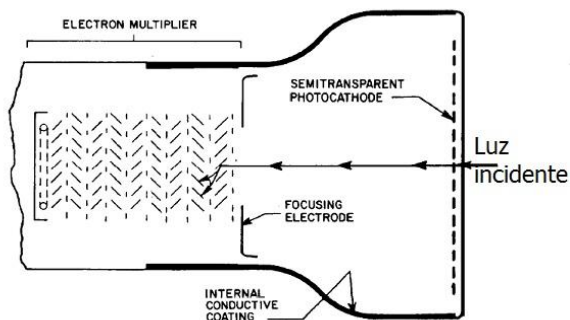


**Figura 2. 12** Diagrama de la configuración Linear focused.

### **Venetian Blind (persiana veneciana)**

Se llama así porque los dinodos se agrupan de tal manera que parecen una persiana veneciana; cada dinodo está formado por láminas inclinadas  $45^\circ$  con respecto al eje del tubo -figura 2.13-. Se utiliza principalmente para tubos fotomultiplicadores frontales de gran diámetro.

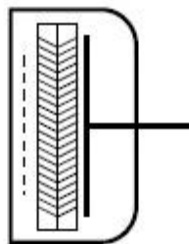
Esta configuración ofrece una buena recolección de fotoelectrones, debido a que crea un campo eléctrico entre sus dinodos, sin embargo debido a su gran tamaño el tiempo de respuesta es lento yendo de 6 a 18ns; su linealidad de pulso es de 10 a 40mA, su inmunidad magnética es de 0.1mT y presenta buena uniformidad.



**Figura 2. 13** Diagrama de la configuración Venetian blind.

### Microchannel plate (Placa de microcanal)

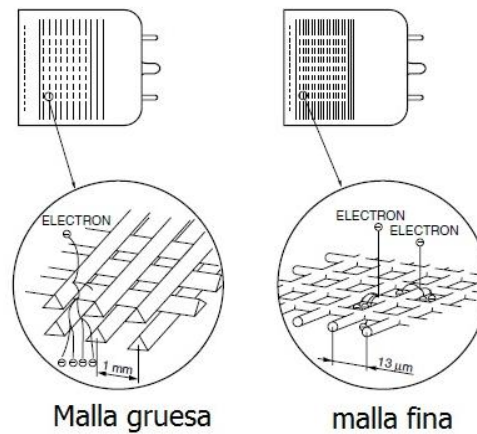
La placa de micro canal es un disco delgado de un milímetro de espesor formado por millones de tubos pequeños fusionados en paralelo -figura 2.15-. Cada canal actúa como un multiplicador de electrones independiente ofreciendo una buena resolución de tiempo: de 0.1 a 0.3ns con una ganancia estable en campos magnéticos altos cercanos a 1500mT puede ser sensible a la posición cuando se combina con un ánodo especial; la linealidad de pulso es de 700mA, presenta buena uniformidad y buena eficiencia de recolección.



**Figura 2. 14** Diagrama de la configuración Microchannel plate.

### Mesh (malla de dinodos)

Estos arreglos de dinodos son diferentes a los anteriores ya que consiste en planos paralelos de alambre fino formando una malla - figura 2.14-. Su eficiencia de recolección es baja pero está diseñado para operar en campos magnéticos cercanos a un tesla entre 500mT y 1500mT.



**Figura 2. 15** Diagrama de configuración de Mesh.

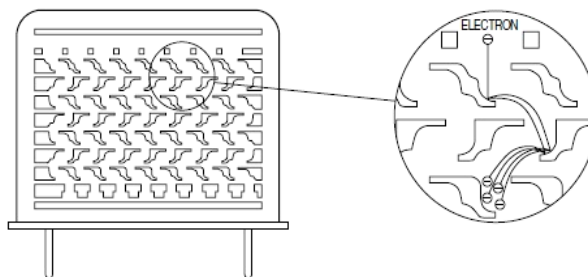
La ganancia se reduce para campos de esa magnitud siendo de  $10^4$  en dinodos de 16 etapas. Tiene un tiempo de respuesta rápida que va de 1.5 a 5.5 ns y puede ser usado para detección de posición, la linealidad de pulso es de 300 a 1000 mA y presenta buena uniformidad.

### Metal Channel Dinodo (Dinodo de canal de metal)

Este es un arreglo muy compacto -figura 2.16- que consta de dinodos muy delgados fabricados de acuerdo a las trayectorias de electrones simulados por una computadora; cada dinodo está muy



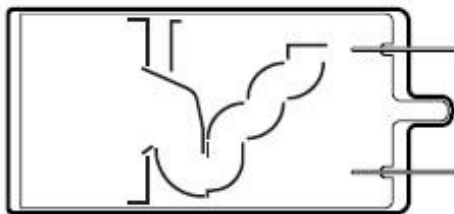
cercano al otro y la trayectoria de los electrones es muy corta por lo tanto garantiza una velocidad de respuesta muy alta: 0.65 a 1.5ns. Es ideal para la medición de la posición y funciona en campos magnéticos cercanos a 5mT, su linealidad de pulso es de 30mA, presenta buena uniformidad y una muy alta eficiencia de recolección.



**Figura 2. 16** Diagrama de la configuración Metal Channel dinodo.

También existen combinaciones entre arreglos de dinodos como por ejemplo *box and grid* y *linear focused* -figura 2.17- esta combinación ofrece un mayor tiempo de respuesta, mejor resolución, mayor linealidad de pulso y una mayor recolección de electrones comparada con *box and grid*.

Otra combinación es circular *cage y linear focused* que mejora la linealidad de pulso manteniendo lo compacto de circular-cage.



**Figura 2. 17** Diagrama de la configuración de la combinación de dinodos de *Box and grid* y *linear focoused*.

## 2.5 Ánodos

La función principal del ánodo es recoger a todos los electrones secundarios que salen del último dinodo del sistema de multiplicación y dar una corriente de salida. Los ánodos están diseñados para optimizar las trayectorias de los electrones, generalmente tienen forma de placa, varilla o malla.

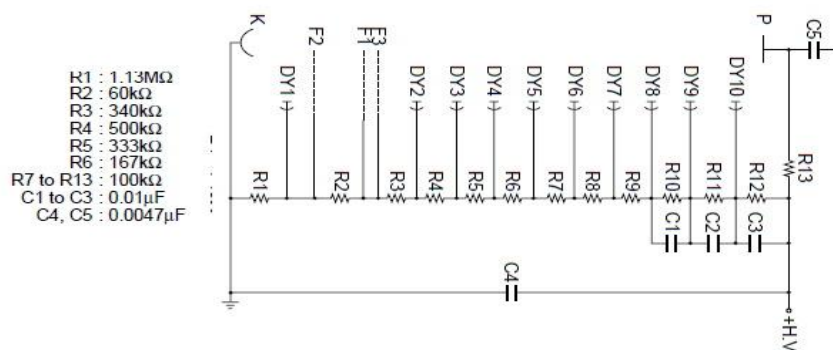
El ánodo debe de tener la diferencia de potencial adecuada entre el último dinodo y el ánodo, de no ser así la corriente de salida puede ser muy grande.

## 2.6 Base divisora de voltaje

Se emplea un divisor de voltaje para tener un voltaje estable y regulado ya que existe una variación de corriente en todo el PMT que afecta el voltaje entre los dinodos.

El divisor de voltaje consiste en una cadena de resistencias que distribuyen el alto voltaje entre el cátodo, los electrodos de enfoque, los dinodos y el ánodo, también se emplean capacitores ya que en algunos casos la corriente de los dinodos finales puede ser mayor. Para suministrar el alto voltaje se puede trabajar de dos maneras diferentes con la base negativa o con la base positiva.

La base positiva trabaja con el cátodo conectado a tierra, mientras que la base negativa trabaja con el ánodo conectado a tierra y el cátodo conectado al alto voltaje negativo. En la -figura 2.18- se aprecia el diagrama de las bases que fabrica Hamamatsu.



**Figura 2. 18** Diagrama de la base divisora de voltaje para el PMT R5912 de Hamamatsu.

## 2.7 Características de los PMT's

### 2.7.1 Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta está determinado principalmente por el tiempo que tardan los fotoelectrones emitidos desde el fotocátodo en llegar al ánodo -todos los PMT's están diseñados para que la diferencia de tiempo de transito sea mínima-.

El aumento del voltaje de alimentación mejora la velocidad de los electrones lo que disminuye el tiempo de tránsito.

### 2.7.2 Linealidad

La linealidad es proporcional a la cantidad de luz que entra en el PMT y la corriente de salida. Los tubos fotomultiplicadores presentan buena linealidad en un amplio intervalo de niveles de luz incidente, sin embargo si la cantidad de luz incidente es muy grande, la salida empieza a desviarse de la linealidad ideal -esto es provocado por las

características de la linealidad del ánodo o del cátodo-. La linealidad depende principalmente de los materiales del fotocátodo.

### **2.7.3 Uniformidad**

Es la variación de la señal de salida con respecto a la posición de la luz incidente en el fotocátodo. Los electrodos de enfoque de un PMT están diseñados para que los electrones emitidos desde el fotocátodo sean recogidos de manera eficiente por el primer dinodo, esta eficiencia de recolección varía con la posición del fotocátodo debido a que algunos electrones se desvían de sus trayectorias deseadas afectando la eficiencia de recolección.

### **2.7.4 Corriente oscura**

Un PMT al operar bajo completa oscuridad no debe tener ninguna señal de salida si no está expuesto a una fuente de luz de lo contrario existe una corriente de salida llamada “corriente oscura”.

Lo ideal es que esta corriente sea lo más pequeña posible, las causas que la producen son:

- Emisión termoiónica: ésta se produce en fotocátodos y dinodos en los que su función de trabajo es muy baja, emitiendo electrones termoiónicos a temperatura ambiente, esta es la principal causa de corriente oscura en los tubos fotomultiplicadores.
- Emisión de campo: esta es emitida por el campo eléctrico cuando se le aplica un voltaje alto al PMT.

- Radiación: se origina por los rayos cósmicos que pasan a través del vidrio y emiten luz Cherenkov.

## 2.8 El PMT R5912

Antes de elegir un PMT es muy importante tener en cuenta los requisitos y características que tiene el experimento en el que se van a utilizar para aprovecharlo al máximo.

El Observatorio HAWC funciona detectando Luz Cherenkov en agua, esta luz tiene una longitud de onda entre 350 y 550nm y en agua produce un cono de  $41^\circ$  por lo tanto necesitamos un PMT de gran diámetro para recolectar la mayor cantidad de fotones, con una ventana de borosilicato y un fotocátodo bialkali que trabajan perfectamente en este rango de longitudes de onda.

El modelo R5912 de Hamamatsu Photonics cumple con estos requerimientos, está diseñado para aplicaciones de física de altas energías ofreciendo un tiempo de respuesta rápido, alta ganancia, buena estabilidad y una corriente oscura baja.

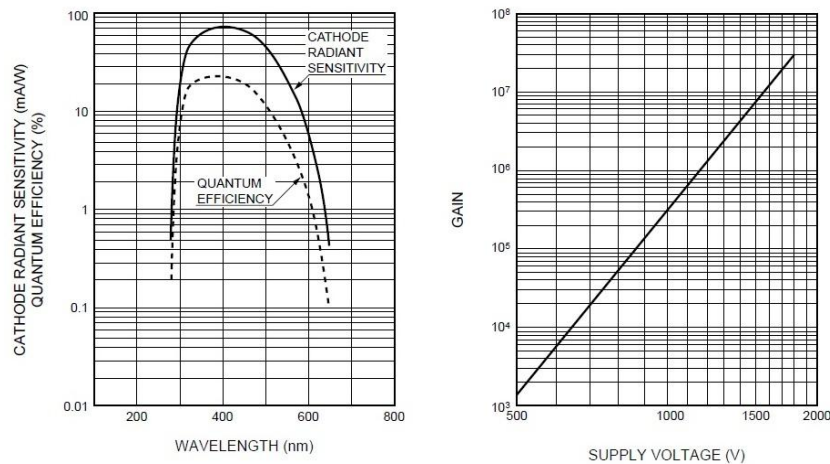
### 2.8.1 Características generales

El R5912 es de 8 pulgadas de diámetro, de tipo frontal y semiesférico, el fotocátodo tiene un diámetro de 190mm, su superficie sensible es de  $330\text{cm}^2$  con un peso aproximado es de 720 gramos.

La ventana de entrada de este PMT está fabricada de vidrio de Borosilicato de 3mm que únicamente transmite luz con longitudes de

onda mayores a 300nm, alcanzando una transmisión eficiente en 420nm –figura 2.19 lado izquierdo–

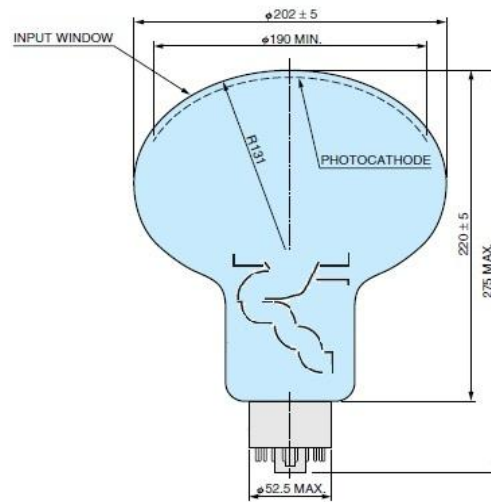
El fotocátodo es de bialkali (SbKCs) que cuenta con una sensibilidad de 300 a 900 nanómetros. La eficiencia máxima de este fotocátodo se da a una longitud de onda de 390nm alcanzando un 25%, soporta temperaturas de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  y una presión de 7atm.



**Figura 2. 199** A la izquierda se presenta la curva de sensibilidad radiante y la eficiencia cuántica para los PMT's R5912 y R7081, del lado derecho se encuentra la ganancia en función del alto voltaje.

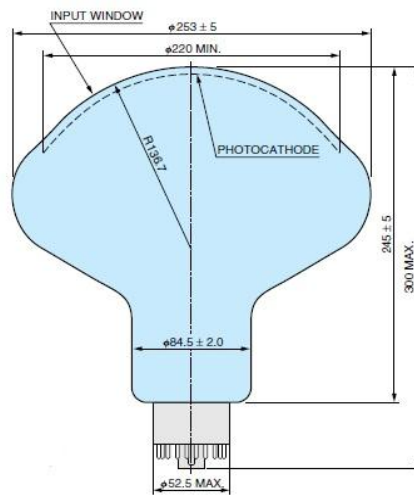
El sistema de multiplicación está compuesto por 10 dinodos configurados en combinación *box and grid* y *linear focoused*, -figura 2.20- con lo que se logra un tiempo de respuesta rápido tardando 2.4ns en llegar al ánodo, su linealidad es de 20 a 40 mA.

Al igual que el fotocátodo, los dinodos son de SbKCs, ofreciendo una ganancia de  $1.0 \times 10^7$  al aplicarle un voltaje de alimentación entre 1500 y 1800 Volts.



**Figura 2. 20** Diagrama dimensional del PMT R5912 y la configuración de dinodos box and grid-linear focoused.

El otro modelo que utiliza HAWC es el R7081, presenta las mismas características, a diferencia de que este tiene un mayor área de recolección, su diámetro es de 10 pulgadas –figura 2.21- y una mayor eficiencia cuántica.



**Figura 2. 21** Diagrama dimensional del PMT R7081

A los PMT's R5912 y R7081 se les agrega un circuito divisor de voltaje y una base de PVC para poder sumergirlos en agua y no se dañe el circuito ver la figura 2.22.



**Figura 2. 20** Imágenes del PMT con su base de plástico y del circuito divisor de voltaje.



## **Capítulo III**

---

# **Sistema automatizado para la calibración de los PMT's.**

---

### **3.1 Objetivo**

Para calibrar un tubo fotomultiplicador se necesita medir su respuesta al hacer incidir un haz de luz sobre un punto de la superficie de su fotocátodo, para esto utilizaremos un LED azul ultra brillante de 900 microcandelas

Para conocer la sensibilidad sobre todo el fotocátodo necesitamos posicionar el LED sobre distintos puntos en la superficie, además

tenemos que aislar al PMT de cualquier fuente de luz externa al momento de suministrarle el alto voltaje.

Para lograr lo anterior se diseñó y se fabricó un sistema automático de posicionamiento de LED que permite hacer mediciones sobre la superficie semiesférica del PMT R5912 –figura 3.1-



**Figura 3. 1** Superficie semiesférica del PMT R5912

## **3.2 Sistema de posicionamiento del LED**

Se divide en dos partes principales:

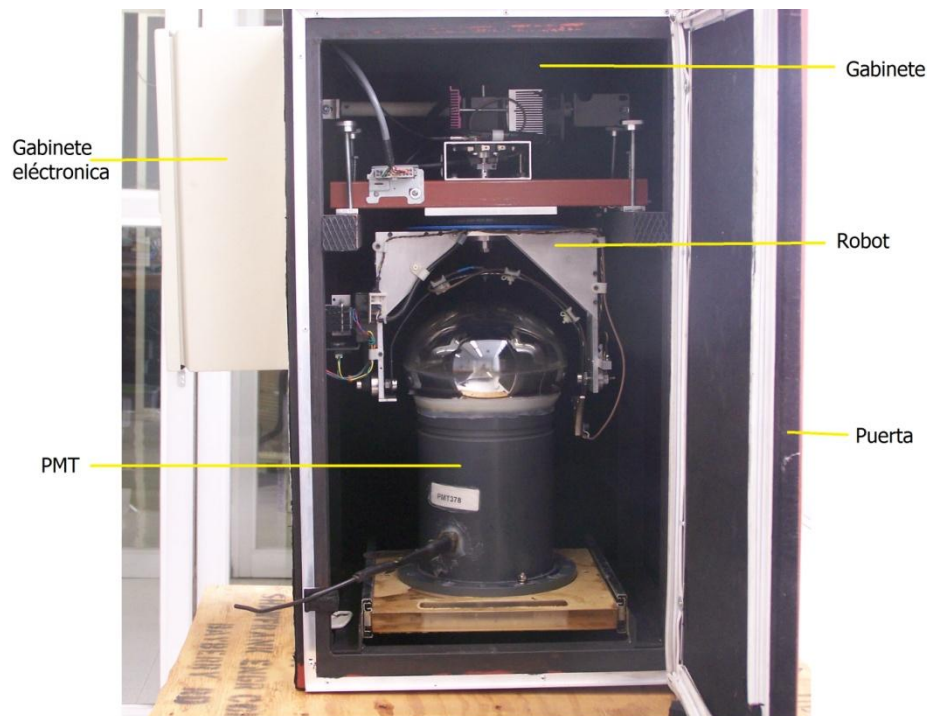
A.- La primera es la parte mecánica que llamamos “robot” encargada de posicionar al LED sobre cualquier punto del fotocátodo, con el movimiento realizado por dos motores a pasos colocados cada uno en ejes de rotación ortogonales.

B.- La segunda parte; es el sistema de control de movimiento que da órdenes a cada motor para que se muevan por medio de un software en una computadora conectada a una tarjeta controladora de motores a pasos.

### 3.3 Gabinete

La función del gabinete es alojar al robot y aislar al PMT de cualquier fuente de luz externa al momento de la calibración –figura 3.2-.

El gabinete es una caja rectangular a prueba de luz de 77cm de alto por 62cm de ancho y 57cm de fondo, formada por una estructura de metal, cubierta con lámina de aluminio doblada. El interior de de la caja es de color negro para evitar cualquier reflexión de luz, cuenta con una puerta que sella magnéticamente.



**Figura 3. 2** Sistema automatizado para la calibración; en el interior del gabinete se encuentra el robot y un PMT, en la parte externa se encuentra el gabinete de electrónica.

En el interior del gabinete se encuentran dos barras de soporte en las que se coloca el robot. Las barras cuentan con perillas de ajuste, que permiten subir y bajar el robot para ajustar la distancia del LED a la superficie del PMT.

En la parte inferior del gabinete se encuentra una charola cuadrada para colocar el PMT, esta charola es de acrílico transparente con una circunferencia en el centro del tamaño de la base del PMT. La charola se desliza de adentro hacia afuera por medio de guías con ruedas, así el PMT siempre tiene la misma posición con respecto al LED.

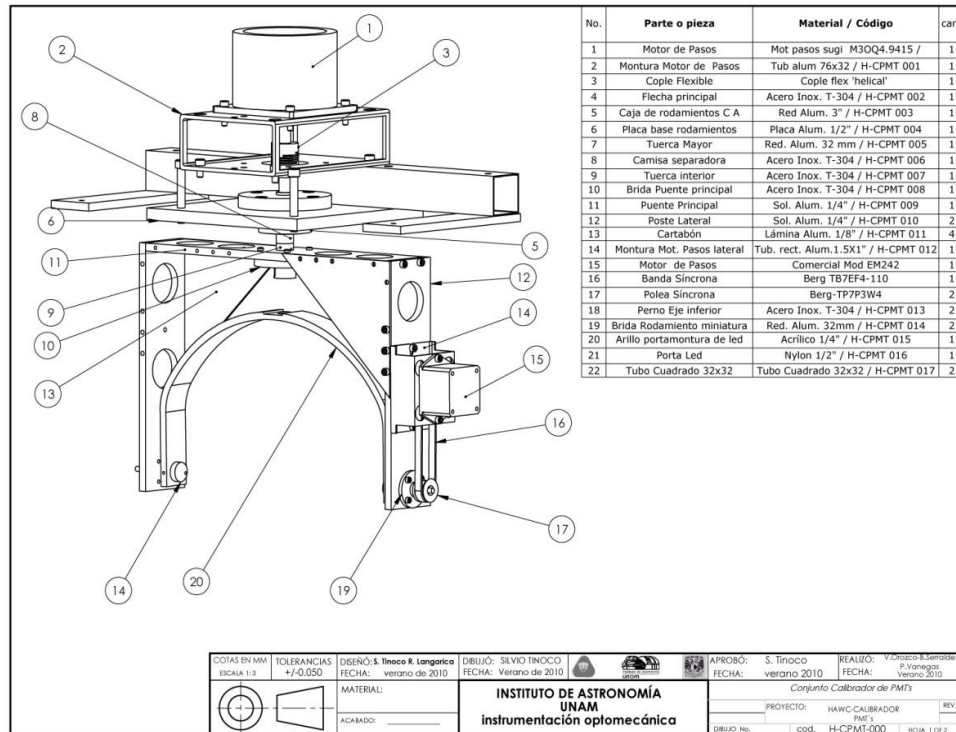


Figura 3. 3 Diagrama de las piezas del robot.

## **3.4 Robot**

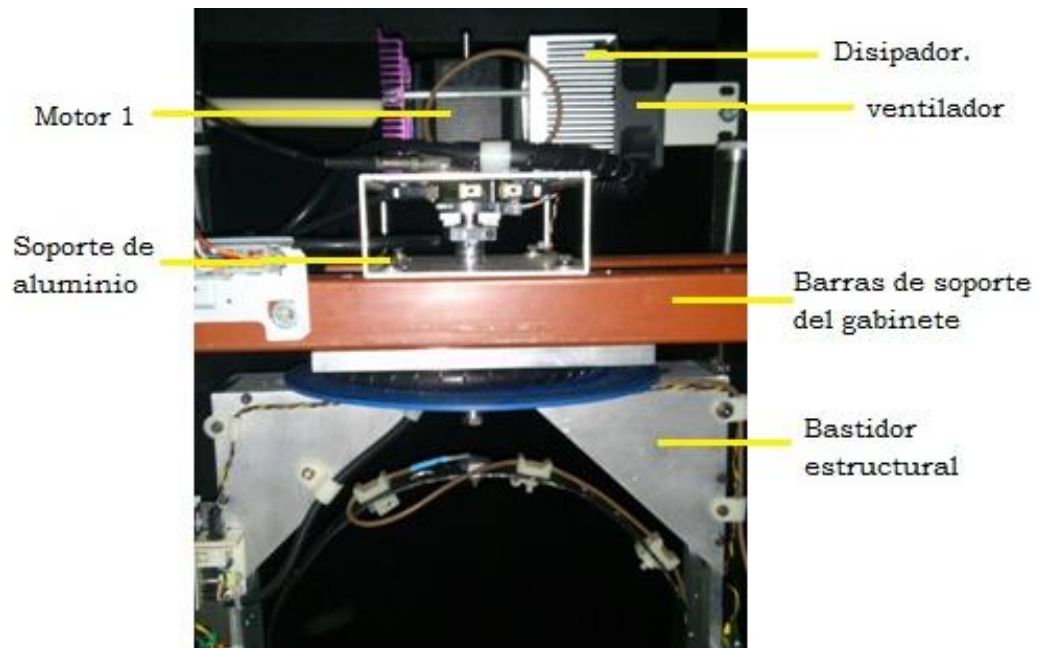
El diseño del robot se basa principalmente en el movimiento del LED sobre la superficie semiesférica del fotocátodo, para esto se utilizaron dos motores a pasos denominados motor1 y motor 2 los cuales mueven arreglos de piezas sobre los ejes de rotación azimutal y vertical. En la -figura 3.3- se muestra el diagrama de las piezas fabricadas para la construcción del robot.

### **3.4.1 Sistema de movimiento azimutal**

Está compuesto por un motor a pasos bipolar -motor 1- de la marca Lin Engineering modelo 5718M-04PD-RD, con un torque máximo de 173 in-oz y puede dar pasos cada  $1.8^\circ$ .

La función de este sistema es girar un bastidor estructural  $360^\circ$  sobre su eje, el motor 1, es sostenido por una montura de aluminio que descansa sobre las barras de soporte del gabinete, quedando el motor justamente sobre el cenit del PMT -figura 3.4-. La flecha del motor se acopla a otra de acero inoxidable por medio de un cople flexible que a su vez se acopla al bastidor estructural.

El motor 1 cuenta con un par de disipadores de calor y un ventilador para enfriarlo porque el aumento de la temperatura el interior del gabinete pueda ocasionar emisión termoiónica en el PMT.

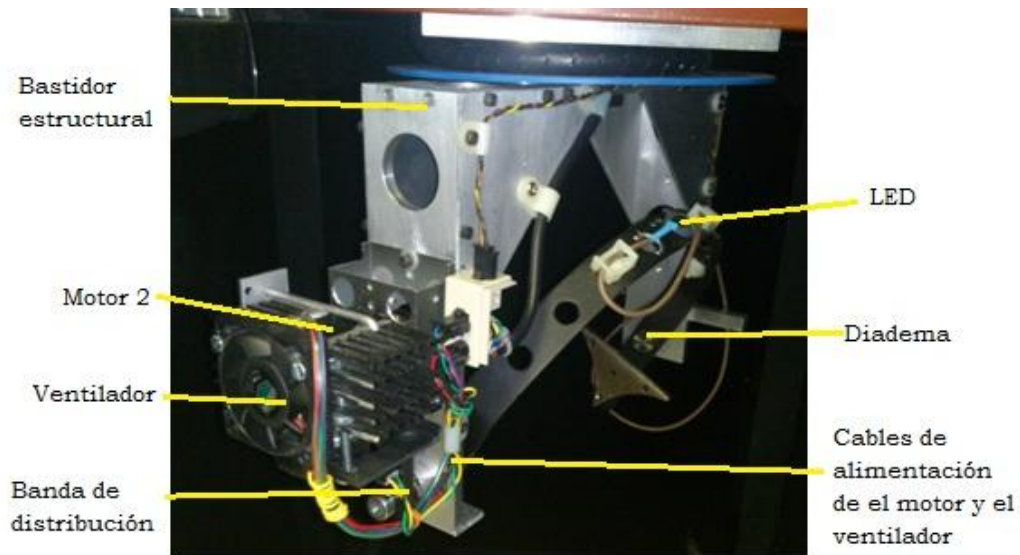


**Figura 3. 4** Sistema de movimiento azimutal en donde el motor 1 se encarga de girar el bastidor estructural 360° sobre su eje.

### 3.4.2 Sistema de movimiento vertical

Está compuesto por el motor 2 que también es un motor a pasos bipolar de la marca Lin Engineering modelo 211-18-01-RO con un torque de 13.7 in-oz –mucho menor que el del motor 1- y da pasos cada 1.8°.

El motor 2 se encuentra sobre una montura unida a un extremo del bastidor estructural -figura 3.5-, la flecha del motor es acoplada a otra flecha por medio de una banda síncrona (banda de distribución), con la que se mueve un arco de aluminio llamado “diadema” que se encarga de sostener el LED.



**Figura 3. 5** Sistema de movimiento vertical, el motor 2 se encarga de girar 180° la diadema porta LED sobre su eje.

La diadema tiene un diámetro de 25cm, se encuentra dentro del bastidor estructural, en el centro de la diadema se encuentra una base de plástico donde se coloca el LED.

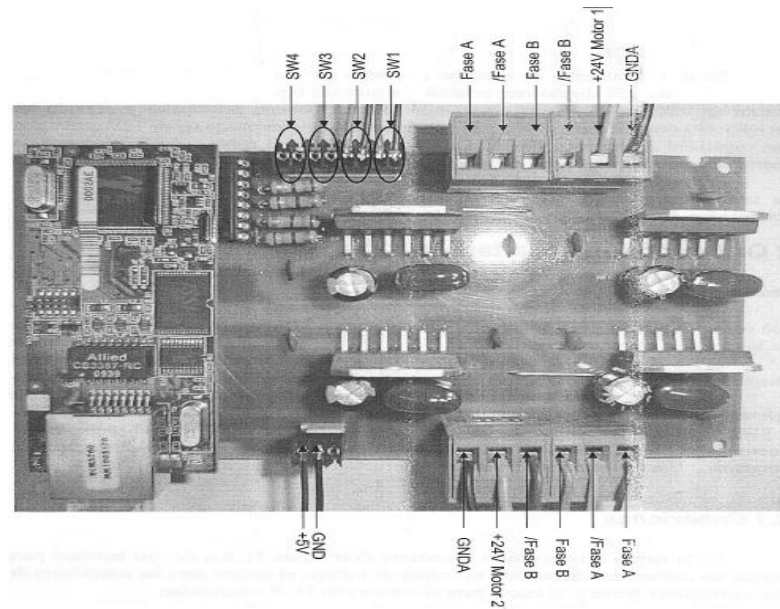
Al girar el motor 2 la diadema gira 180° sobre el eje vertical, también cuenta con un ventilador y un disipador de calor para enfriarlo.

### 3.5 Control del movimiento

Para controlar los motores 1 y 2 se utiliza una tarjeta de control de movimiento diseñada para dos motores a pasos la cual recibe órdenes a través de una computadora conectada a un puerto de red TCP (Protocolo de Control de Trasmisión).

### 3.5.1 Tarjeta de control

La tarjeta de control que se utilizó –figura 3.6- está diseñada para controlar dos motores a pasos bipolares con voltajes de operación entre 12V y 50V y una capacidad de corriente de 3A, ambos motores cumplen con esas características.



**Figura 3. 6** Tarjeta de control.

La tarjeta cuenta con un modulo RCM3700 de la marca Rabbit Core con conexión a red y a puertos digitales de entrada y salida. Para el manejo de la potencia de los motores cuenta con 4 circuitos integrados LMD18200 de la marca National Semiconductor, este es un puente H que maneja 3A de corriente y voltajes de 12 a 50V, -se utilizan dos por motor-.

Cuenta también con 4 entradas para interruptores: SW1, SW2, SW3, SW4; los dos primeros se utilizan para inicializar la posición de los motores 1 y 2. Tiene cuatro conectores, dos para sujetar los cables de cada motor y su alto voltaje, el tercero para las conexiones de los



interruptores límite y el cuarto para alimentar el controlador de los motores.

### 3.5.2 Software de control

El software tiene una interfaz grafica de usuario programada en *Borland Delphi*, está se encarga de mover los motores para posicionar al LED.

Este permite acceder a todos los comandos del controlador y realizar las secuencias de movimiento, consta de dos ventanas principales; la primera en la de configuración de los motores –figura 3.7-.



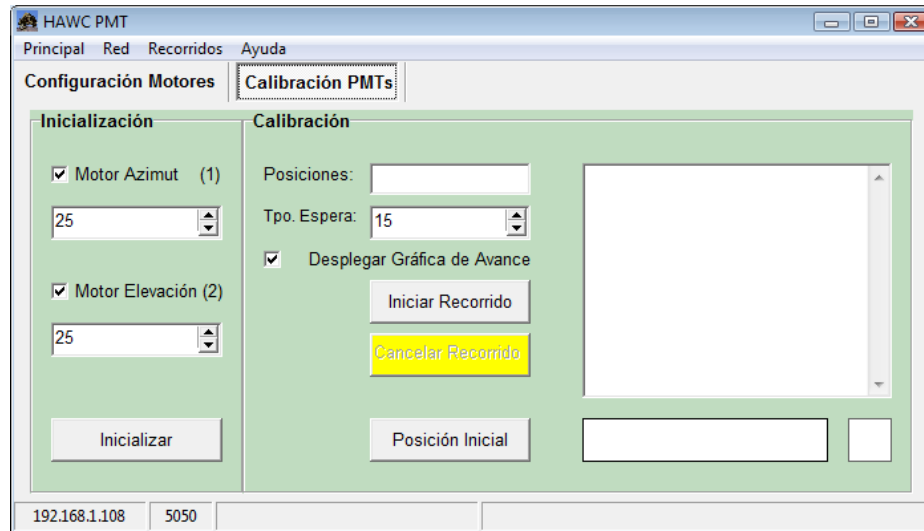
**Figura 3. 7** Ventana de configuración de los motores en donde se pueden apagar los motores, ajustar el sentido de rotación y el número de pasos que queremos que de cada motor.

La ventana permite acceder a los comandos de control que la tarjeta acepta vía red en la dirección de IP 192.168.1.108 y el puerto 5050, de acuerdo a la tabla 3.1.

<b>Instrucción</b>	<b>Descripción</b>
ajusta_periodo_motor1(x); ajusta_periodo_motor2(x);	Ajusta el periodo entre pasos x en milisegundos, después del reset es 5ms. Regresa al valor x.
apaga_motor1; apaga_motor2;	Deja las cuatro fases del motor flotando. Regresa la cadena “motorx apagado”, donde x es 1 o 2.
dame_posicion_motor1; dame_posicion_motor2;	Regresa la posición actual del motor. Después del reset es -1 y 0 después de inicializar el eje.
dame_periodo_motor1; dame_periodo_motor2;	Regresa el valor del periodo de tiempo entre pasos en milisegundos.
inicializar_motor1(s,r) inicializar_motor2(s,r)	Mueve el motor en el sentido s, que puede ser 1 o 0, en busca del interruptor de inicio SW1 para el motor 1 y SW2 para el motor 2. Cuando el interruptor es alcanzado el controlador regresa un 0. Si el interruptor no se alcanza en el tiempo definido por r en segundos el controlador aborta la tarea y regresa la cadena “No llego al SW”
mueve_motor1_a_posicion(x); mueve_motor2_a_posicion(x);	Mueve el motor hacia la posición indicada por x. Regresa el número x cuando la posición es alcanzada.
mueve_motor1(x,s); mueve_motor2(x,s)	Mueve el motor el número de pasos indicados por x, en el sentido definido por s que puede ser 1 o 0. Regresa la posición final del motor.

**Tabla 3. 1** Comandos de control de los motores.

La segunda es la ventana movimiento de los motores –figura 3.8- en la que se escriben las secuencias de movimiento de los motores y el tiempo que se requiere que el motor permanezca en una posición antes de pasar a la siguiente.



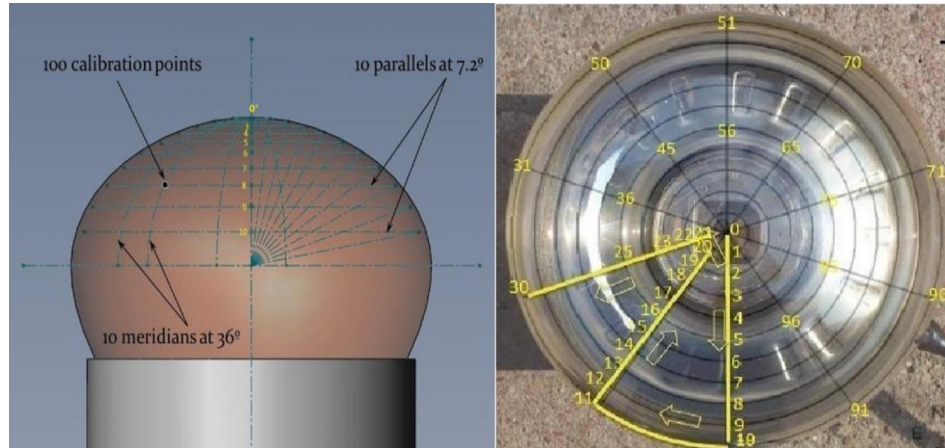
**Figura 3. 8** Ventana de calibración, aquí es en donde se determina la posición o secuencia de posiciones que realizarán los motores y el tiempo de espera en cada punto antes de cambiar de posición.

### 3.6 Recorrido del LED

Para posicionar al LED sobre la superficie, esta se dividió en 10 meridianos y en 10 paralelos que corresponden al movimiento del motor 1 y 2 respectivamente -figura 3.9 izquierda-, en cada intersección se encuentra un punto de medición, en total se tienen 101 puntos.

El recorrido por defecto que realiza el LED sobre la superficie se denomina *zig-zag* debido a que recorre los 101 puntos en orden del 0 al 101, el 0 es el punto de inicio, para llegar al punto 1 el motor 2 se mueve 4 pasos hacia la derecha que equivalen a bajar la diadema cada  $7.2^\circ$  hasta llegar a  $72^\circ$  que son 10 puntos, posteriormente el motor 1 se mueve 20 pasos a la derecha lo que equivale  $36^\circ$  permaneciendo en esa posición hasta que la diadema recorre 10

puntos hacia arriba hasta llegar al punto 20 –figura 3.9 derecha- hasta completar los 101 puntos de la superficie del fotocátodo.



**Figura 3. 9** A la izquierda tenemos que la intersección entre los paralelos y los meridianos son los puntos de medición y a la derecha se presentan un PMT con el recorrido que sigue el LED.

# Capítulo IV

---

## Calibración

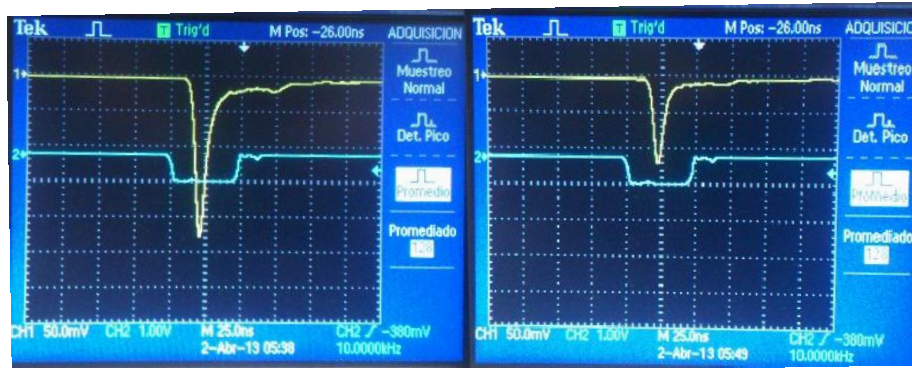
---

En este capítulo se muestra el procedimiento experimental llevado a cabo para la calibración de los tubos fotomultiplicadores R5912, así como una descripción del equipo utilizado y los resultados de las pruebas de calibración.

### 4.1 Objetivo

Una característica de los tubos fotomultiplicadores es que no todos presentan la misma ganancia para una misma señal de entrada a un

mismo voltaje de alimentación –figura 4.1- esto a pesar de que todos son fabricados bajo los mismos procesos. Esto se debe a que la emisión de electrones de cada dinodo es distinta para un mismo voltaje de alimentación.



**Figura 4. 1** La imagen muestra la comparación de los pulsos de dos PMT's con las mismas condiciones de alimentación de voltaje y de iluminación del LED. La traza inferior muestra la compuerta de integración.

La calibración consiste en encontrar el voltaje de alimentación para que dada una misma señal de entrada, los 900 PMT's R5912 que componen el arreglo de HAWC presenten la misma ganancia, de  $1.5E+07$ , este valor se determinó a partir de PMT's calibrados en Los Álamos National Laboratory. De acuerdo a las características del fabricante, el R5912 presenta una ganancia promedio de  $1.0E+07$  en un intervalo de voltajes de 1500 a 1900V.

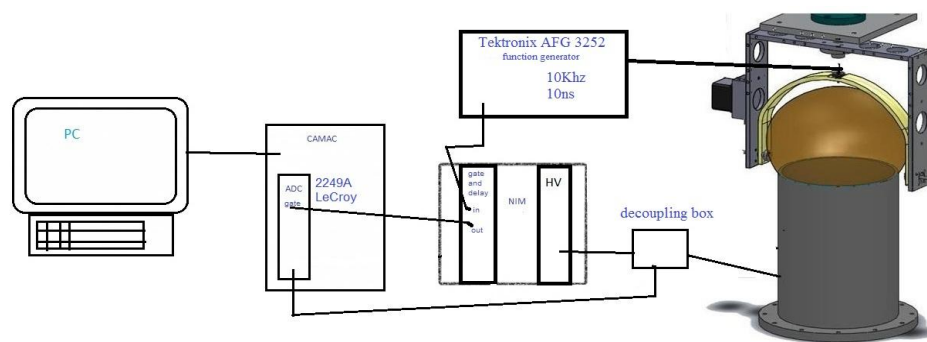
Se necesita encontrar el valor de la ganancia para distintos voltajes de alimentación, cuando más grande es el voltaje aplicado más grande es el valor de la ganancia.

## 4.2 Dispositivo experimental

Para la calibración de los PMT's se necesita medir la carga recogida por el ánodo al incidir fotones sobre la superficie del fotocátodo, para

esto se utiliza un QDC (por sus siglas en inglés Charge to Digital Converter que en español es Convertidor de Carga Digital), con este se obtiene la distribución de carga en el número de cuentas, i.e la superposición de señales generadas por cada uno de los n-fotones que llegan al fotocátodo.

En la -figura 4.2- se presenta un diagrama conceptual del montaje experimental.



**Figura 4. 2** Diagrama del dispositivo experimental para la calibración de los PMT's

En donde tenemos:

- LED azul ultra brillante (9000mcd) cuya emisión se centra en 470nm, que es colimado con una fibra óptica quedando una distancia entre la punta de la fibra y la superficie del fotocátodo de 3mm.
- Generador de pulsos marca Tektronix modelo TFG300, con el que se puede generar luz de baja intensidad equivalente a emitir un solo fotoelectrón.
- Osciloscopio marca Tektronix modelo TDS 2024C para analizar la señal directamente del PMT.
- Módulo NIM (Nuclear Instrument Module) de la marca ORTEC modelo 4001A -es un sistema electrónico que permite alimentar

12 módulos independientes dependiendo de las características del experimento-.

- Módulo de alto voltaje de la marca CAEN modelo N471 que alimenta de HV a los PMT permitiendo variar el alto voltaje en un rango de 0 a 2000V, nosotros utilizaremos voltajes en un rango de 1500 a 1900V.
- -Gate and Delay Generator de la marca Technoland Corp modelo N-RY005 que sirve para abrir una compuerta que permite integrar la señal del PMT al momento de la adquisición de datos.
- -CAMAC (Computer Automated Measurement And Controles) -es un sistema de adquisición de datos que puede ser controlado por una computadora a través de módulo dataway el cual nos proporciona la interface con la PC.
- -QDC de la marca LeCroy modelo 2249A este dispositivo -se encarga de digitalizar la carga total del ánodo para obtener un valor numérico integrando la señal del ánodo-. Tiene una sensibilidad de entrada de .25pC/cuenta.
- Caja desacopladora -se utiliza para separar la señal del PMT, ya que por el mismo cable se alimenta de alto voltaje y nos manda la señal de salida.
- -PC con la que se controla el sistema de calibración y se guardan los datos obtenidos por el QDC.

La lógica del arreglo experimental es la siguiente: el PMT es alimentado por el módulo de alto voltaje. El generador de pulsos manda dos señales una que va directo al LED, esta es una señal cuadrada con un ancho de 10ns a 10kHz, cuando es iluminado el PMT este convierte el pulso luminoso en una señal eléctrica de salida, esta señal se desacopla del alto voltaje y es enviada directamente al QDC para integrar la carga de los pulsos, la otra señal que sale del generador de pulsos va directo al Gate and Delay,



para abrir una compuerta de 30 nanosegundos para que el QDC pueda integrar esta señal.



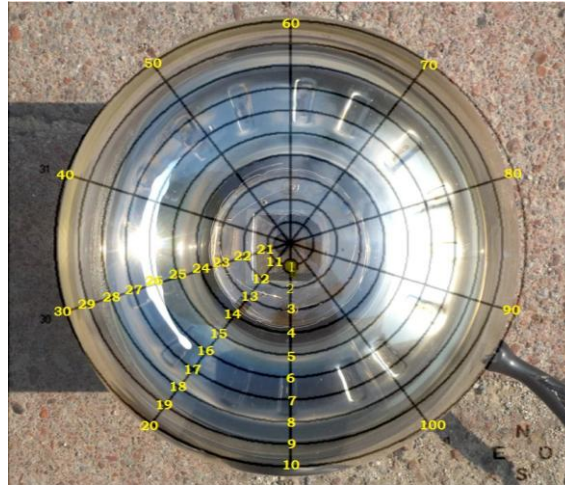
**Figura 4. 3** Imagen del dispositivo experimental en el laboratorio del Instituto de Física de la UNAM.

### 4.3 Sensibilidad del fotocátodo.

Para conocer la sensibilidad, se barrió la superficie del fotocátodo con el LED, para ello se usó el sistema de calibración para obtener el valor de la carga en cada uno de los 100 puntos en los que se posiciona el LED.

Se trabajó con un voltaje de alimentación para los PMT's de 1700V, pues es un voltaje intermedio entre 1500 y 1900V que es el rango en el que operan los PMT's R5912. Las características del pulso son: un pulso cuadrado con anchura de 10ns, frecuencia de 10kHz y amplitud de 2.1Volts.

El recorrido del LED que se programó en el software para la medición se muestra en la -Figura 4.4-. Se divide en 10 líneas separadas entre sí  $36^\circ$ , el LED recorre cada línea de arriba hacia abajo en 10 puntos cada  $7.2^\circ$ .

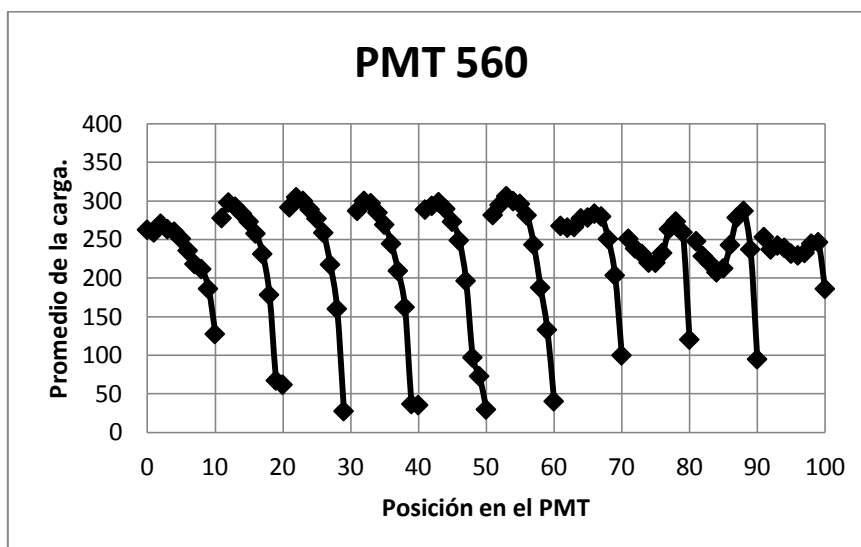


**Figura 4. 4** Líneas de recorrido del LED y orientación del PMT al momento de la medición.

En la –figura 4.5- se presenta la grafica del promedio de la carga en función de la posición de incidencia de los fotones sobre la superficie del fotocátodo para el PMT 560 (cada uno de los 900 PMT's tiene un numero de serie asignado). En donde se tienen 10 grupos de datos que corresponden a cada una de las 10 líneas de medición.

En la primera línea se tienen los puntos del 0 al 10 el punto 0 se ubica en el cenit, en la segunda los puntos del 11 al 20 y así sucesivamente hasta llegar a la línea 10 que tiene los puntos del 91 al 100.

Tenemos que el promedio de la carga aumenta ligeramente para después disminuir bruscamente en los extremos, este comportamiento ocurre en las primeras 6 líneas de medición siendo lógico que mientras mayor ángulo de incidencia de fotones con respecto del centro, el valor de la carga disminuya, pero en las 4 restantes el comportamiento es diferente, como se aprecia la carga disminuye un poco para luego aumentar y caer en el punto más distante pero vemos que la carga no disminuye tanto con respecto a las 6 primeras líneas.

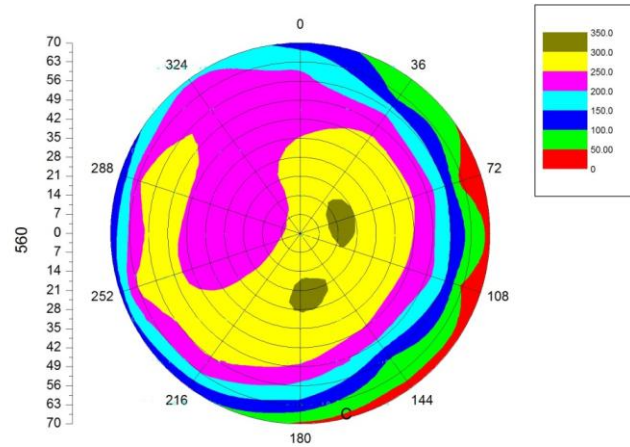


**Figura 4. 5** Grafica del promedio de la carga obtenida por el QDC en función de la posición de la incidencia de fotones sobre el PMT 560.

Otra forma de apreciar la sensibilidad es con un mapa de la carga en coordenadas polares, -la figura 4.6- muestra que regiones presentan mayor y menor sensibilidad representadas por colores en intervalos de carga de 50 unidades.

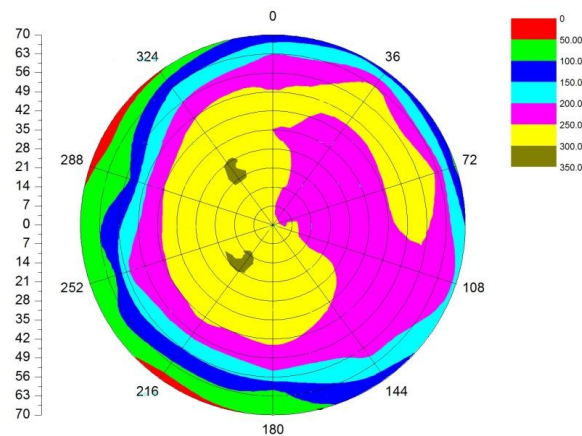
Se aprecia que el fotocátodo no es simétrico con respecto a su sensibilidad, de un lado presenta cargas en los extremos entre 0 y 50 mientras que de lado contrario las cargas están entre 100 y 150.

Inicialmente se pensó que el comportamiento de las 4 líneas finales o en este caso de la parte izquierda del mapa pudiera estar relacionado con una variación en un campo magnético, ya sea el terrestre o algún campo cercano al laboratorio que pudiera influir en la medición, por lo que se realizaron medidas girando el PMT dentro del gabinete 180° sobre su eje.



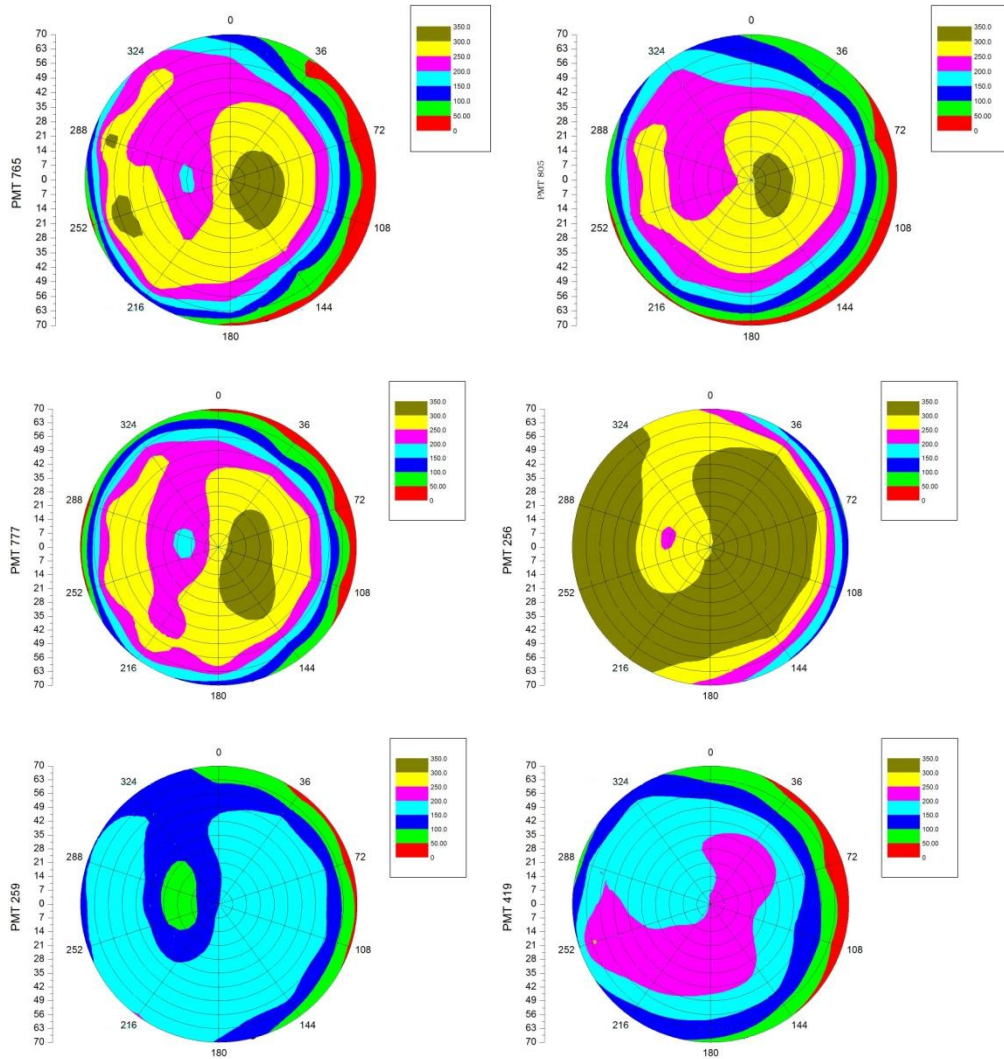
**Figura 4. 6** Mapa de sensibilidad sobre la superficie del fotocátodo.

A continuación en la figura 4.7 se presenta el mapa del PMT 560 girado, en donde se observa que la superficie del fotocátodo sigue el mismo comportamiento, con lo que quedo descartada alguna alteración por campo magnético.



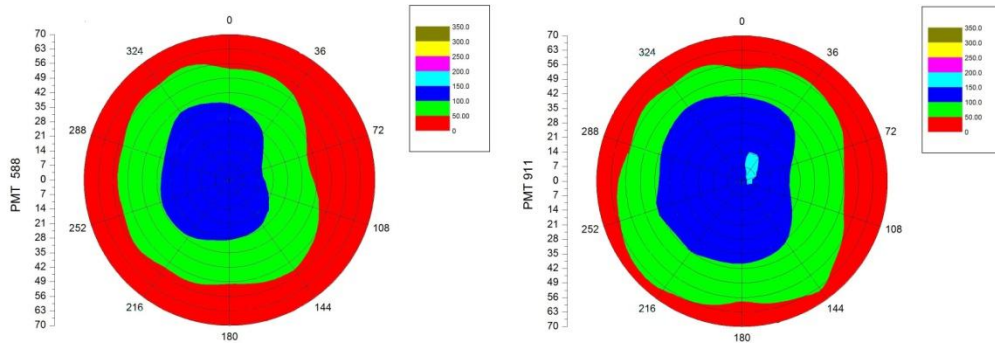
**Figura 4. 7** Mapa de la sensibilidad del PMT 560 rotado 180° con respecto a su posición inicial.

Este mismo comportamiento se presenta en un 80% de los PMT's R5912 medidos hasta el momento, a continuación se presentan los mapas de los PMT's 765, 805, 777, 256, 259 y 419 todos medidos bajo las mismas condiciones: voltaje de alimentación de 1700V, pulso del LED de 2.1V con frecuencia de 10kHz y 10ns de anchura.



**Figura 4. 8** Mapa de la sensibilidad de distintos PMT's

También se encontraron PMT's, en donde se aprecia una mayor simetría, pero presentan regiones de carga más bajas como el PMT 586 y el 911.



**Figura 4. 9** Mapa de la sensibilidad de los PMT's 586 y 911 en donde vemos que presentan una región de sensibilidad mínima muy grande.

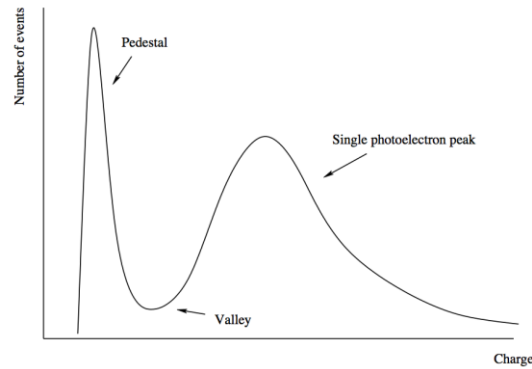
#### 4.4 Foelectrón único.

Un fotoelectrón (PE) es la mínima intensidad de luz que se necesita para poder desprender un solo electrón del fotocátodo y producir con ello un flujo de corriente a través de los dinodos del PMT.

El espectro característico de un fotoelectrón es como el que se muestra en la -figura 4.10-.

En donde se tiene la carga en función del número de cuentas, se presenta dos picos, el pico de la izquierda es el llamado pedestal -producido cuando no se tiene ningún evento de fotoelectrones- si el PMT no recibiera ninguna señal del LED las distribuciones de carga corresponderían únicamente al pedestal. El segundo pico corresponde a la señal de respuesta de un solo fotoelectrón.

Los dos picos se pueden ajustar mediante una distribución Gaussiana.



**Figura 4. 10** Espectro típico de un fotoelectrón. En donde el primer pico representa el pedestal y el segundo pico es la respuesta de un solo fotoelectrón.

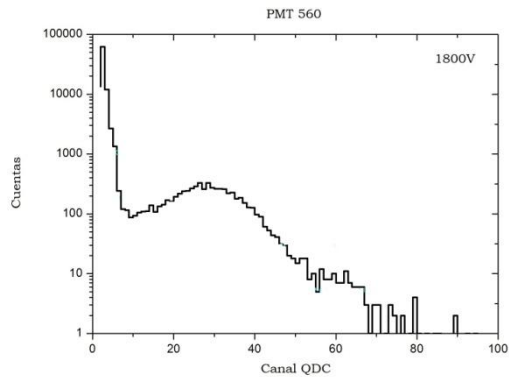
## 4.5 Ganancia

La ganancia es la amplificación de la carga que va del fotocátodo al ánodo, para obtener su valor se necesita medir la respuesta del PMT cuando incide un solo fotoelectrón.

El primer paso para obtener la ganancia es encontrar el espectro de fotoelectrón único en función del voltaje de operación, para ello la amplitud del pulser se ajusta hasta encontrar el perfil mostrado en la -figura 4.10-.

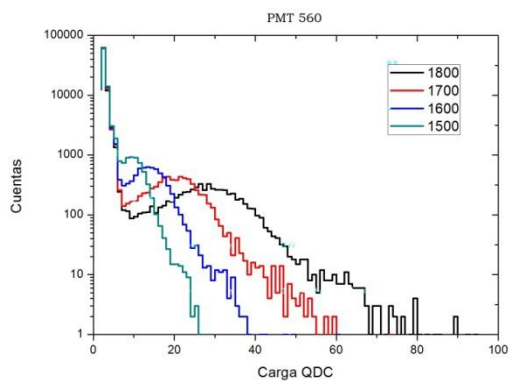
En la -figura 4.11- se muestra el espectro encontrado para un fotoelectrón del PMT 560 a un voltaje de alimentación de 1800V y una amplitud de 1.930 para el LED, en donde se puede notar claramente el pedestal y el pico del fotoelectrón.





**Figura 4. 11** Espectro encontrado para un fotoelectrón.

Una vez encontrado el perfil se mantiene fija la amplitud de la señal del pulser y se toman las curvas correspondientes al fotoelectrón único para diferentes voltajes. Estos espectros se ajustan a una distribución gaussiana para determinar el valor máximo de los picos.



**Figura 4. 12** Espectro del fotoelectrón para 1800, 1700, 1600 y 1500V.

En la –figura 4.12- tenemos el espectro de un fotoelectrón a 4 diferentes voltajes de alimentación obteniendo curvas distintas, cuando se alimenta el PMT con un voltaje de 1500V apenas se puede apreciar la curva del fotoelectrón ya que esta se encuentra muy cerca



del pedestal, mientras que a 1800V el pico de la curva del fotoelectrón se aleja del pedestal disminuyendo su altura.

Conforme aumenta el HV el pico del PE se aleja del pedestal, mientras que a menor HV el pico se acerca cada vez más al pedestal, mientras que este siempre se mantiene en la misma posición.

Para encontrar la ganancia se utilizó la siguiente fórmula en donde:

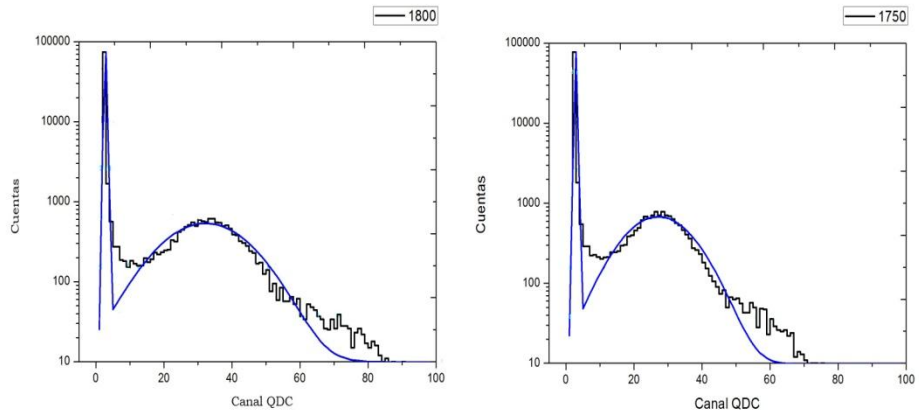
$$Ganancia = 2.5^{-13} C / \text{cuentas} \frac{x_2 - x_1}{1.6 \times 10^{-19} C} \quad (4.1)$$

La ganancia es la diferencia entre los picos del pedestal y del fotoelectrón en unidades de carga del electrón, donde  $X_2$  es el centro de la gaussiana del fotoelectrón y  $X_1$  es el centro de la gaussiana del pedestal. Una cuenta del QDC equivale a .25pC.

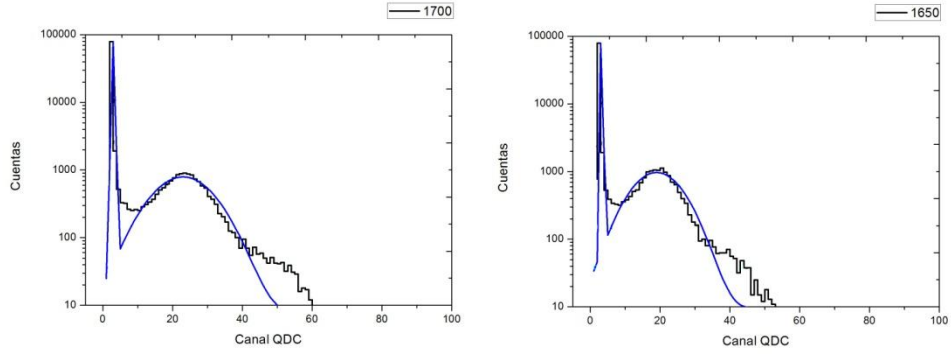
Se tomaron las curvas del fotoelectrón cada 50V para voltajes de alimentación entre 1400 y 1800V, a sus respectivos espectros se les realiza un ajuste de curva lo que nos permite determinar el valor máximo o pico del pedestal y del PE.

Los picos se ajustaron utilizando el programa ORIGIN 8 que es un software estadístico destinado al análisis de datos que nos permite realizar un ajuste gaussiano de cada uno de los dos picos.

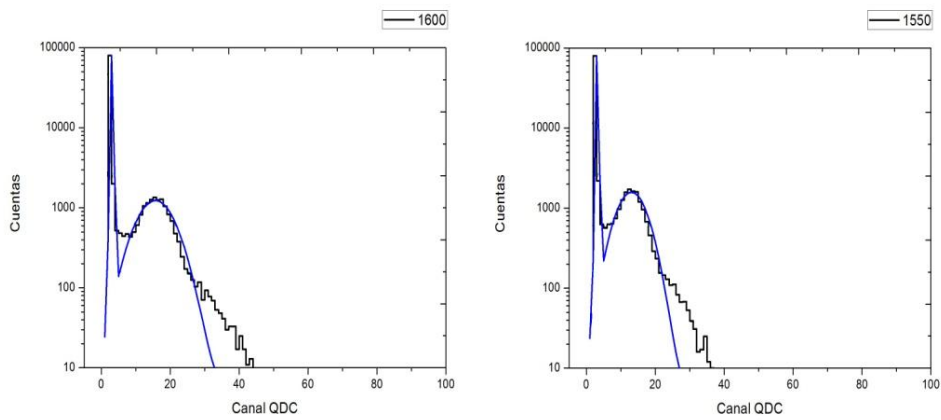
En las -figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17- podemos ver el ajuste de los perfiles obtenidos para el PMT 568 disminuyendo el voltaje de 1800 a 1350V cada 50V. La escala vertical se hace logarítmica para poder apreciar el pedestal completo.



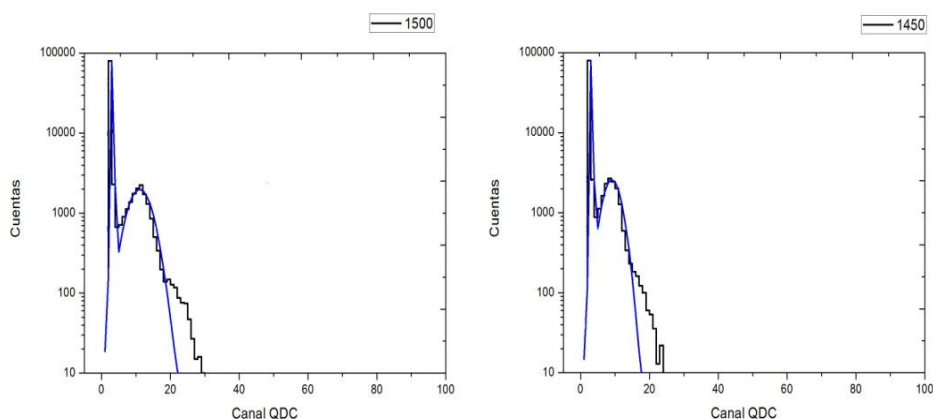
**Figura 4. 13** Ajuste de los perfiles para 1800 y 1750V



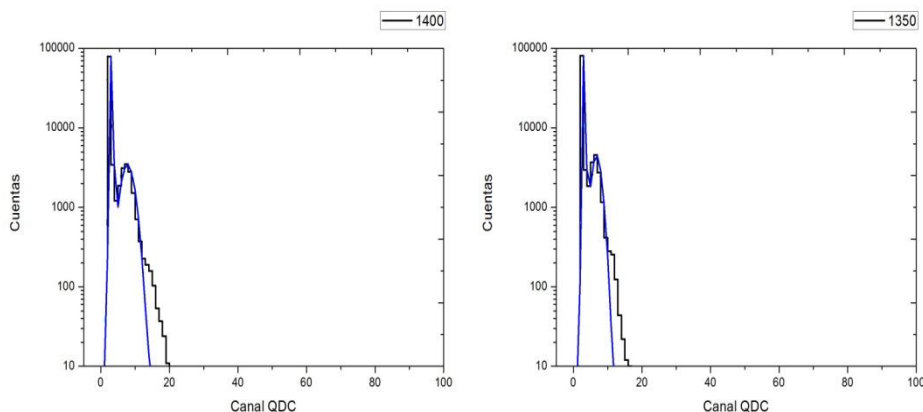
**Figura 4. 14** Ajuste de los perfiles para 1700 y 1650V



**Figura 4. 15** Ajuste de los perfiles para 1600 y 1550V



**Figura 4. 16** Ajuste de los perfiles para 1500 y 1450V



**Figura 4. 17** Ajuste de los perfiles para 1400 y 1350V

En la -tabla 4.1- se encuentran los valores de la ganancia obtenidas con la -formula 4.1- para el PMT 568. En donde se aprecia que la ganancia aumenta con el voltaje de alimentación, para una ganancia de 1.5E+07 se encuentra a 1550V.

<b>PMT 568</b>				
HV	Pedestal	PE	Distancia entre picos	Ganancia
<b>1800</b>	3.155623	33.26578	30.110157	4.70E+07
<b>1750</b>	3.155623	27.17534	24.019717	3.75E+07
<b>1700</b>	3.155623	22.98221	19.826587	3.10E+07

<b>1650</b>	3.155623	19.01485	15.859227	2.48E+07
<b>1600</b>	3.155623	15.7174	12.561777	1.96E+07
<b>1550</b>	3.155623	12.91181	9.756187	1.52E+07
<b>1500</b>	3.155623	11.02012	7.864497	1.23E+07
<b>1450</b>	3.155623	9.12123	5.965607	9.32E+06
<b>1400</b>	3.155623	7.81191	4.656287	7.20E+06
<b>1350</b>	3.155623	6.7768	3.621177	5.66E+06

Tabla 4. 1

Cuando el valor de la ganancia se encuentra entre dos valores como por ejemplo:

<b>PMT 560</b>				
HV	Pedestal	PE	Distancia entre picos	Ganancia
<b>1600</b>	3.016352	14.14859	11.132238	1.74E+07
<b>1550</b>	3.016352	12.05119	9.034838	1.41E+07

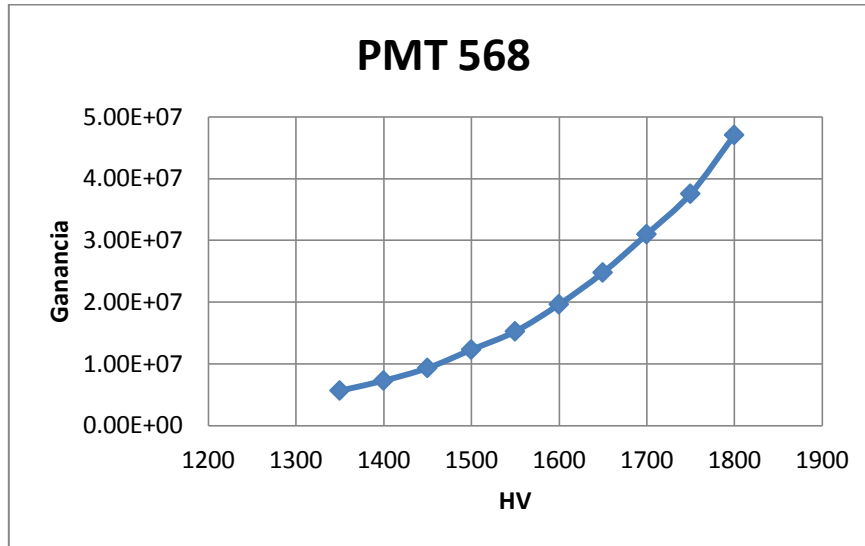
Tabla 4. 2

Se encuentra el perfil del fotoelectrón pero en intervalos más pequeños, en este caso cada 10V como se muestra en la -tabla 4.3- hasta encontrar la ganancia, es este caso el voltaje de alimentación es 1570V.

<b>PMT 560</b>				
HV	Pedestal	PE	Distancia entre picos	Ganancia
<b>1600</b>	3.016352	14.14859	11.132238	1.74E+07
<b>1590</b>	3.016352	13.64411	10.627758	1.66E+07
<b>1580</b>	3.016352	13.23761	10.221258	1.60E+07
<b>1570</b>	3.016352	12.76217	9.745818	1.52E+07
<b>1560</b>	3.016352	12.35104	9.334688	1.46E+07
<b>1550</b>	3.016352	12.05119	9.034838	1.41E+07

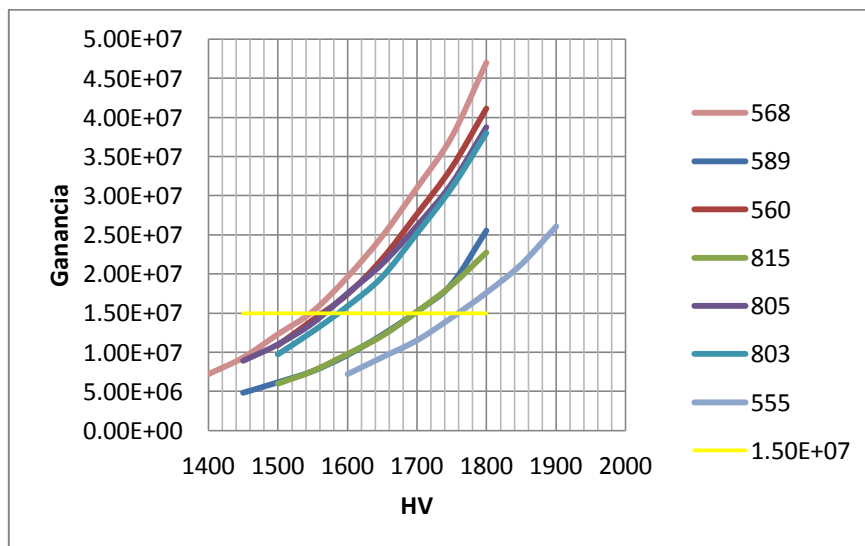
Tabla 4. 3

En la –figura 4.18- se muestra la ganancia en función del alto voltaje, en donde vemos que la ganancia aumenta de manera exponencial.



**Figura 4. 18** Curva de la ganancia en función del alto voltaje aplicado al PMT 568

Este mismo procedimiento se realiza para cada uno de los PMTs, en la grafica 4.19 se presentan las curvas de ganancia de 7 PMT's diferentes.



**Figura 4. 19** Curva de ganancia para 7 PMT's

En total se han medido 109 PMT con la ayuda del sistema de calibración, en la tabla 4.5 se presentan 66 PMTs con su número de serie y su voltaje de operación.

<b>PMT</b>	<b>HV</b>	<b>PMT</b>	<b>HV</b>	<b>PMT</b>	<b>HV</b>
59	1495	153	1680	815	1700
640	1495	239	1680	742	1705
767	1495	494	1680	256	1710
391	1535	400	1685	264	1710
917	1535	620	1685	296	1710
503	1555	496	1690	471	1710
756	1555	547	1690	581	1710
83	1565	911	1690	765	1710
53	1565	332	1695	299	1760
747	1565	366	1695	555	1760
786	1565	474	1695	588	1760
560	1570	483	1695	599	1760
805	1570	505	1695	766	1800
487	1580	508	1695	116	1810
803	1590	566	1695	618	1810
718	1605	628	1695	636	1810
741	1605	713	1695	259	1830
191	1630	758	1695	673	1840
469	1630	811	1695	501	1850
231	1680	820	1695	716	1850
608	1685	419	1705	702	1870
740	1685	589	1700	497	1885

**Tabla 4. 4**

# Capítulo V

---

## Conclusiones

---

El objetivo de esta tesis consistió en encontrar la ganancia de los PMT's R5912 para el Observatorio HAWC con la ayuda del sistema de calibración diseñado y fabricado para este proyecto.

El método de calibración consistió en encontrar el espectro en función de la carga y del número de cuentas del QDC para un fotoelectrón, y por medio de un ajuste gaussiano encontrar el valor máximo de los picos del pedestal y del fotoelectrón para distintos voltajes de alimentación. Y por medio de la -formula 4.1- encontrar la ganancia.

Con la ayuda del sistema de calibración se midió la sensibilidad del fotocátodo en unidades de carga, con esto se pudo realizar un mapa de la sensibilidad del fotocátodo en donde se aprecian las regiones que presentan mayor y menor sensibilidad.

Se encontró que la sensibilidad sobre la superficie del fotocátodo no es simétrica, esto se puede deber a que anteriormente fueron utilizados por lo que el fotocátodo se ha ido desgastando ó puede ser por la posición de la ventana de entrada de los dinodos. Pues del lado donde se encuentra la ventana de entrada presenta una sensibilidad más alta con respecto a su parte opuesta.

Se encontraron PMT's con muy poca sensibilidad en unidades de carga, con un mapa de sensibilidad (figura 4.9) diferente a la mayoría de los PMTs, estos ya se encuentran en los tanques de HAWC por lo que se observara su comportamiento.

Los mapas de sensibilidad servirán para colocar los PMT's dentro de los detectores en posiciones definidas, porque de acuerdo a su simetría no es lo mismo que detecte un fotón de un lado o de otro del fotocátodo, esto posiblemente se puede implementar mediante simulaciones Montecarlo.

Con la obtención de la ganancia se agrupan los PMT's de acuerdo a su voltaje de alimentación para colocarlos en grupos dentro de los tanques. Por ejemplo al tanque F17 se le asignaron los PMT's 332, 366 y 474, los tres con un voltaje de operación de 1695V. En total se han colocado 35 tanques en el Observatorio HAWC lo que equivale a 105 PMT's.



---

## Bibliografía

---

- Abeyssekara, A.U et al. «On the sencitivity of the HAWC observatory to gamma-ray burst.» *Astroparticle Physics*, vol 35 (2012 ): 641-655.
- Alfaro, R. «A robot to characterize the photocathode response of the HAWC 8" photomultiplier.» *Proceedings of the 31st ICRC* (2009).
- Carter, D. *Photomultiplier handbook- Theory, desing and application*. Lancaster: Burle Technologies, 1988.
- DeYoung, T. «The HAWC observatory.» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol 692 (2012): 72-76.
- Gonzalez, M. «Observing the universe at TeV energies with the HAWC observatory.» *Proceeding of the 30th ICRC* (2007).
- Gonzalez, M,. «Un nuevo observatorio de rayos gamma en México.» *Revista digital Universitaria UNAM*, Vol 10. No 10. (2009).
- Hamamatsu, Photonics K.K. *Photomultiplier tubes and assemblies for scintillation counting and high energy physics*. japon, 2010.
- . *Photomultiplier tubes and related products*. japon, 2012.
- . *Photomultiplier tubes basic and applications 3ra edicion*. Word Thecnical Writing, 2006.

- Karn, P. «The pre-installation testing of the HAWC photomultiplier tubes.» 2012.
- Knoll, Glem F. *Radiation Detection and Measurement*. 1999.
- Langarica, R. «A system for the characterization of the HAWC PMT's sensitivity.» (s.f.).
- Mostafa, M. «A Water Cherenkov Detector prototype for the HAWC Gamma-Ray Observatory.» *Proceeding of the 32nd* (2011).
- Murillo, F. «Control de motor de pasos para dos ejes de movimiento.» 2010.
- Sinnis, G. «Water cherenkov technology in gamma-ray astrophysics.» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 623* (2010): 410-412.
- S-O, Flyckt. «Photomultiplier tubes principles and applications.» (2002).
- Vasileiou, V. «Photocathode uniformity test of the Hamamatsu R5912 Photomultiplier Tubes Used in the Milagro Experiment.» *30th International Cosmic Ray Conference* (2007).
- Vasquez, O. «Primer prototipo HAWC: un observatorio de rayos gamma en México.» 2011.