

Caracterización de un montaje Si PM orientado a diversas aplicaciones

(SiPM performance characterization for several applications)

Trabajo Máster de Física Nuclear 11/12:

Alumno: Alberto Fernández Guijarro alberto_r_fernandez@hotmail.com

Tutor: José Manuel Udías Molinero jose@nuc2.fis.ucm.es

Keywords: SiPM, Temperature, Resisitance, Net Compensation

Palabras clave: SiPM, Temperatura, Resitencia, Red Compensación

Contenido

1.	Introducción	4
	Definición de Imagen Médica, un poco de historia. Técnicas PET y MR.....	4
	Detalles de la técnica PET	4
	Evolución de los fotodetectores hasta el SiPM.....	6
	Posibles Aplicaciones: Detectores Radiación en reactores de Fisión, detectores de radiación en hospitales y en ambientes externos, y aplicación a la imagen médica.....	8
2.	Pruebas de variación con la temperatura de propiedades de semiconductores. Eficacia de la cámara climática.	9
I.	Medidas de la variación de la Resistencia con la Temperatura	9
	Presentación de las primeras medidas y configuraciones de medición	11
II.	Medidas con una fuente de Cs 137	17
	Medidas de la variación del centroide del fopico con la temperatura.....	19
	Medidas del centroide con la temperatura con red de compensación	22
	Reescalado de las gráficas con red de comensación	25
3.	Conclusión	27
	Referencias.....	28

Figuras

Figura 1: Tipos de coincidencias para la formación de imagen en un sistema de detección PET (figura tomada de ref [3])	5
Figura 2: Montaje de Fototubo con un cristal centelleador	6
Figura 3: Esquema de un Pixel de un MPPC (APM en montaje modo Geiger con una resistencia de extinción) (figura tomada de ref[5]).....	7
Figura 4: Circuito esquemático de un MPPC (figura tomada de ref [5]).....	8
Figura 5: Material Utilizado en el montaje del laboratorio	9
Figura 6: Descripción del montaje del laboratorio	10
Figura 7: Pared de cartón perforada.....	11
Figura 8: Curva de caracterización de la resistencia Subiendo la Temperatura	11
Figura 9: Curva de caracterización de la resistencia Bajando la Temperatura	12
Figura 10: Representación de $\ln(1/R)$ frente a $(1/T)$ para el cálculo del GAP del semiconductor	13
Figura 11: Curva de Histéresis de la Resistencia frente a la Temperatura	14
Figura 12: Diferencia de errores entre modelos lineal y exponencial para $V_{in}=30$ Volts	15
Figura 13: Diferencia de errores entre modelos lineal y exponencial para $V_{in}=50$ Volts	16
Figura 14: Diferencia de errores entre modelos lineal y exponencial para $V_{in}=70$ Volts	16
Figura 15: Montaje para la adquisición de medidas de la variación de la ganancia de los SiPM con la temperatura	17
Figura 16: Adquisición de datos por medio del Módulo MCA y Pocket Cassy.....	18
Figura 17: Espectros a diferentes temperaturas sin compensación	19
Figura 18: Espectros a todas las temperaturas medidas sin la red de compensación	19
Figura 19: Variación del centroide con la temperatura sin red de compensación.....	20
Figura 20: Datos de Ganancia frente a voltaje y temperatura (ref[5])	20
Figura 21: Datos de Ganancia respecto a la posición del centroide	21
Figura 22: Variación del centroide con la temperatura en la configuración 1	22
Figura 23: Posición del centroide con la red de compensación de ganancia en configuración 1	23
Figura 24: Variación de la posición del centroide con la temperatura en la configuración 2.....	23
Figura 25: Resultados de la Red de Compensación en configuración 2	24
Figura 26: Red de Compensación 1 reescalada	26
Figura 27: Red de Compensación 2 reescalada	26

1. Introducción

A lo largo de este trabajo se pretende definir y desarrollar los parámetros característicos y esenciales de un montaje Si PM (photomultiplier).

Dicho montaje y las aplicaciones, entre las que la imagen médica será una de las más importantes, serán descritas a lo largo de la introducción evaluando las principales ventajas e inconvenientes de esta tecnología.

A lo largo de este trabajo se realizarán diversas medidas para su caracterización y se propondrán soluciones a diversos comportamientos adversos del montaje y sus respectivas respuestas, tratando de ofrecer una respuesta congruente para cada comportamiento en todo momento.

Definición de Imagen Médica, un poco de historia. Técnicas PET y MR.

La imagen médica ha supuesto una revolución en detección, diagnóstico y evolución de enfermedades o patologías. Desde sus comienzos, con las primeras observaciones y publicaciones acerca de los Rayos X realizadas por Röntgen a finales del siglo XIX (iniciando la radiología); continuando por la obtención de imágenes realizada a través de la resonancia magnética (MRI), hasta llegar hoy en día al PET y SPECT.

Normalmente, se espera obtener una buena imagen biomédica, combinando técnicas como PET/MRI (ref[1]). Dicha combinación de técnicas permite obtener una imagen morfológica (por medio de la MRI) y una funcional (a través del PET utilizando un trazador FDG (fluorodesoxiglucosa)) de la zona a estudiar.

Detalles de la técnica PET

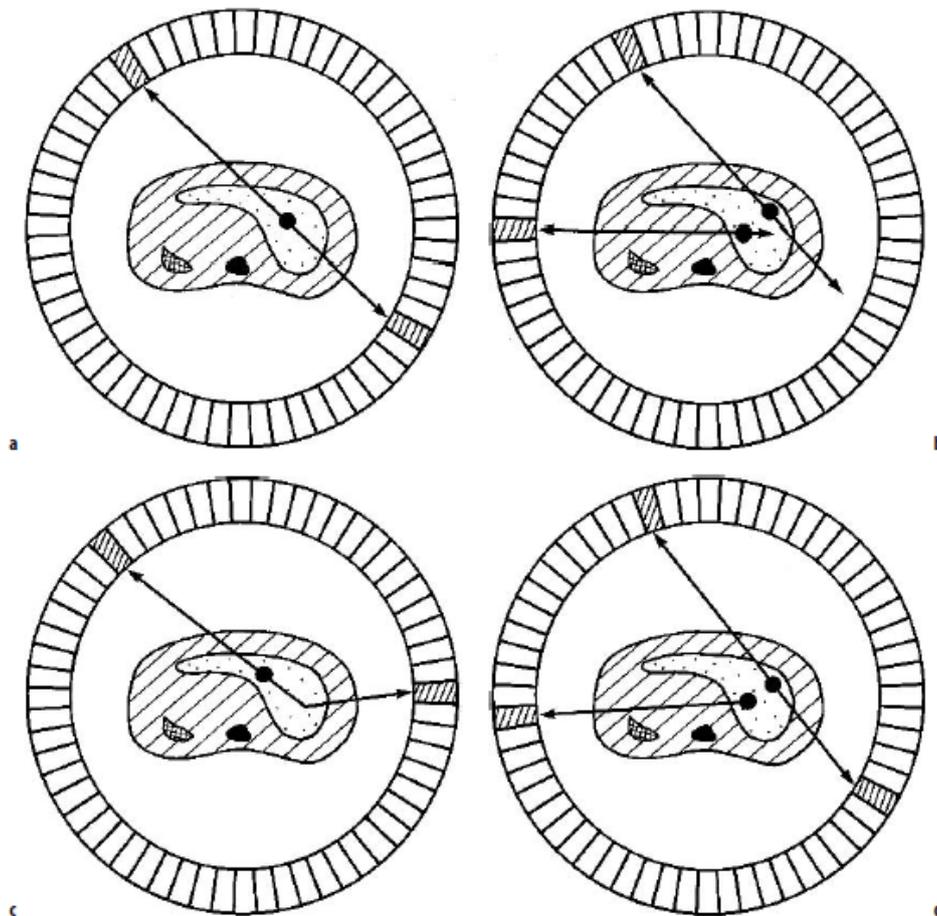
La técnica de imagen por PET no responde a una nueva propuesta, ya que en los años cincuenta Brownell y Anger desarrollaron los primeros dispositivos de dicha imagen. El principal motivo de este desarrollo fue el interés por encontrar en la naturaleza un proceso de desintegración de positrones (ref[3]). De este modo cuando dicho positrón encuentra un electrón pierde la energía que contiene; sin embargo cuando toda esta energía se ha perdido, el electrón y el positrón se combinan formando el positronio. Dicho estado ligado, positronio, es inestable y decae en algún momento vía aniquilación en un par de fotones antiparalelos, pero no es la única posibilidad de aniquilación del positronio.

Anteriormente, en 1949 Ore & J.L. Powell desarrollan un cálculo teórico (ref[4]) en el que consideran dos estados posibles para este sistema electrón-positrón dependiente de los estados de acoplo entre espines de partícula y antipartícula. Obteniendo un estado singlete o función de onda antisimétrica respecto al spin se desintegrará produciendo dos gammas; o un estado triplete o simétrico respecto al spin que se desintegra produciendo tres gammas.

La transición entre estos estados, aunque permitida por Gammow-Teller (M1), no sería posible ya que cuenta con menor probabilidad que la propia desintegración del estado triplete.

La aniquilación del positronio produce dos gammas de 511 keV que viajan en direcciones diametralmente opuestas. De esta manera, rodeando al paciente con un oportuno sistema de detección, los dos rayos gammas se detectan en coincidencia ya que llegan al mismo tiempo al sistema de detección. De este modo, se puede asumir que el sistema de origen de esta emisión está a lo largo de la línea que une los dos puntos de impacto de los rayos gamma en los detectores (Line Of Response-LOR). El número total de coincidencias detectadas por ambos detectores están relacionados con la integral de la actividad a lo largo de la LOR que une dos detectores. De manera que midiendo la integral de la actividad a lo largo de esta LOR se pueden adquirir datos de proyección que se pueden reconstruir para formar una imagen de distribución de emisión de positrones dentro del objeto.

Esta técnica cuenta con la gran limitación en el diseño de la medición de coincidencias mientras se excluyen coincidencias aleatorias, dispersiones (Compton) o coincidencias múltiples de dichos fotones.



Tipos de coincidencia detectados en sistema de imagen PET a) Coincidencias verdaderas b) Coincidencias accidentales, los dos fotones identificados en la llegada de coincidencia han sido originados de desintegraciones diferentes c) Dispersión, uno de los fotones ha originado una dispersión Compton antes de ser detectado d) Múltiples coincidencias. Más de dos fotones llegan en coincidencia. Aparte de las coincidencias verdaderas, todas las otras resultan de información espacial

Figura 1: Tipos de coincidencias para la formación de imagen en un sistema de detección PET (figura tomada de ref [3])

Otro gran reto en esta técnica es determinar el origen de la desintegración del positronio. De modo que el positronio, dependiendo de su energía, puede viajar unos cuantos milímetros a través del tejido antes de decaer. Por otra parte, si el positronio sigue teniendo algo de energía una vez aniquilado, los dos gammas emitidos no forman un ángulo exacto de 180° , sino que pueden tener una diferencia con la dirección colineal mayor de $\pm 6^\circ$.

Evolución de los fotodetectores hasta el SiPM

En este apartado describimos brevemente la evolución de los fotodetectores y su evolución hacia el montaje SiPM (Si photomultiplier).

Este tipo de montaje centelleador, denominado así cuando se une un material centelleador, el cual exhibe luminiscencia cuando por él pasa una radiación ionizante, y se encuentra unido a un sensor de luz como un tubo fotomultiplicador o fotodiodo. Este acoplamiento de material centelleador y fotomultiplicador se realiza con frecuencia por medio de una grasa óptica (dicha grasa cuenta con un índice de refracción similar al del centelleador y el fototubo), este acoplamiento tiene como objetivo recolectar el mayor número de fotones emitidos por un fuente y la mayor eficiencia en la transporte de los mismos.

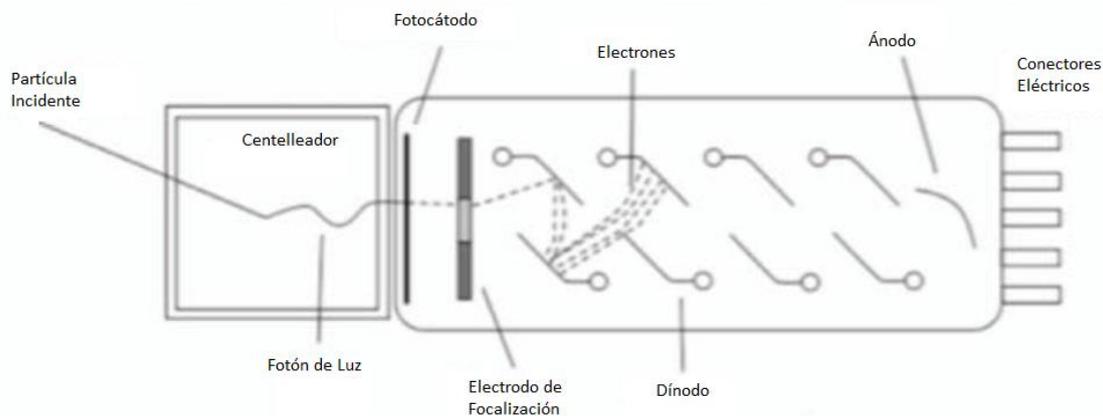


Figura 2: Montaje de Fototubo con un cristal centelleador

Para este fin, el fotocátodo (que libera electrones debido a la incidencia de fotones provenientes del centelleador) emite electrones enfocados hacia el primer dínodo. En éste, los electrones generados son acelerados hasta el segundo dínodo gracias a una gran diferencia de tensión entre dínodos, que impactan de nuevo en el siguiente dínodo. Este proceso se repite hasta llegar al ánodo con una ganancia que dependerá del número de electrones generados por cada electrón incidente y del número de etapas del fotomultiplicador.

Este tipo de montaje tiene como un gran inconveniente que es muy sensible a los campos magnéticos externos. Este hecho dificulta combinar las técnicas, MRI y PET.

Los SiPM son también dispositivos de detección de fotones con montaje de tipo centelleador, pero en este caso los detectores son dispositivos de estado sólido, en los que se tiene una matriz de detectores (pixeles) formada de fotodiodos de avalancha o APD en modo Geiger. Al igual que en el montaje centelleador con fototubos, en el montaje SiPM es necesario un cristal centelleador que absorba la energía de la radiación gamma incidente y reemita dicha energía en fotones dentro del espectro visible.

Estos dispositivos SiPM demandan menor tensión de funcionamiento o trabajo y su geometría es más compacta que la de los fototubos. Otra diferencia reseñable entre los fototubos y SiPMs es que estos últimos no se ven afectados por campos magnéticos externos (ref[3]).

Los APD (diodos de avalancha, diseñados para operar en polarización inversa) son fotodiodos que generan pares electrón-hueco cuando un fotón, de energía mayor que el GAP, atraviesa la zona de carga espacial. Estos portadores minoritarios son acelerados debido a la tensión en inversa ionizando la red y produciendo más portadores en un fenómeno conocido como multiplicación por avalancha.

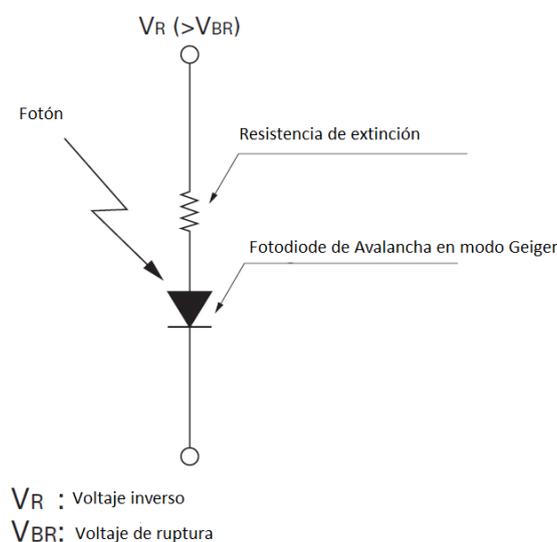


Figura 3: Esquema de un Pixel de un MPPC (APM en montaje modo Geiger con una resistencia de extinción) (figura tomada de ref[5])

Este modo Geiger opera con una tensión ligeramente superior a la tensión de ruptura, pudiendo alcanzar ganancias entorno a 10^5 o 10^6 .

Al iniciarse la avalancha, producida por el fotoelectrón que a su paso en la zona de carga espacial genera pares electrón-hueco que son acelerados por la diferencia de tensión, se crea una circulación de electrones a lo largo de la resistencia de extinción, dicha corriente en la resistencia reduce la tensión inversa hasta igualarla al voltaje de ruptura, deteniendo o extinguiendo la avalancha. Esta resistencia de extinción permite la llegada de pulsos de nivel constante.

Por último el MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) está formado por píxeles, APDs conectados en paralelo y operando en modo Geiger con su resistencia de extinción.

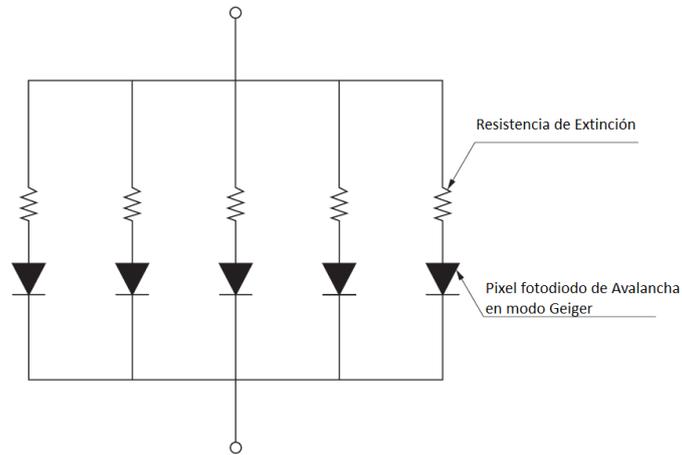


Figura 4: Circuito esquemático de un MPPC (figura tomada de ref [5])

Como se observa en la figura anterior, el MPPC recoge en un mismo canal de salida todos los pulsos creados en cada pixel o APD solapándolos, de manera que la altura o carga del pulso de salida es proporcional al número de fotones detectados.

Durante este trabajo acoplaremos un módulo MPPC a un cristal centelleador LYSO, aplicando una grasa óptica adecuada entre ellos, midiendo el espectro de ^{137}Cs mientras variamos la temperatura.

Posibles Aplicaciones: Detectores Radiación en reactores de Fisión, detectores de radiación en hospitales y en ambientes externos, y aplicación a la imagen médica.

Este montaje cuenta con diversas aplicaciones, nos hemos fijado en la imagen médica debido a los beneficios aportados en la combinación de imágenes que se pueden llevar a cabo con este método, pero cabe reseñar la gran cantidad de aplicaciones en la rama de los detectores gamma, debido a la reducción en peso y tamaño de este aparato de detección.

2. Pruebas de variación con la temperatura de propiedades de semiconductores. Eficacia de la cámara climática.

Con el objetivo de probar la eficacia de la cámara climática empelada en este proyecto, caracterizaremos la variación con la temperatura de varias resistencias variables con la temperatura.

I. Medidas de la variación de la Resistencia con la Temperatura

Como punto de partida del proyecto caracterizaremos la termoresistencia con un sencillo montaje. Para llevar a cabo estas medidas contamos con tres termómetros y una caja de poliestireno expandido (EPS) o comúnmente denominado poliespán, aislando el experimento del ambiente.

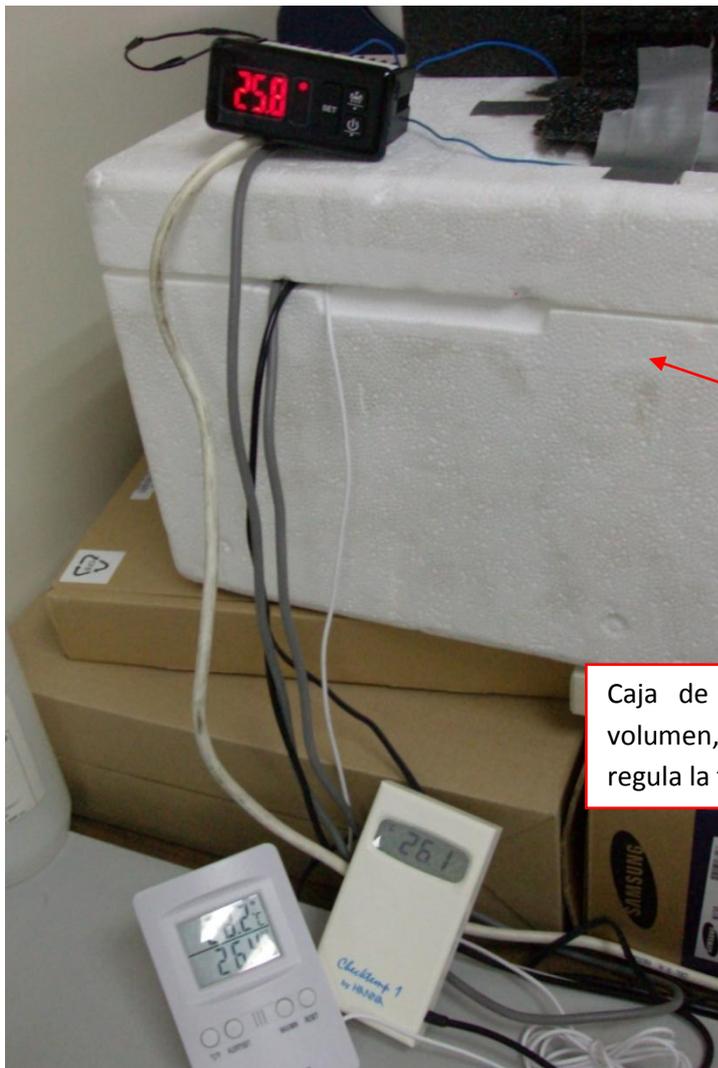
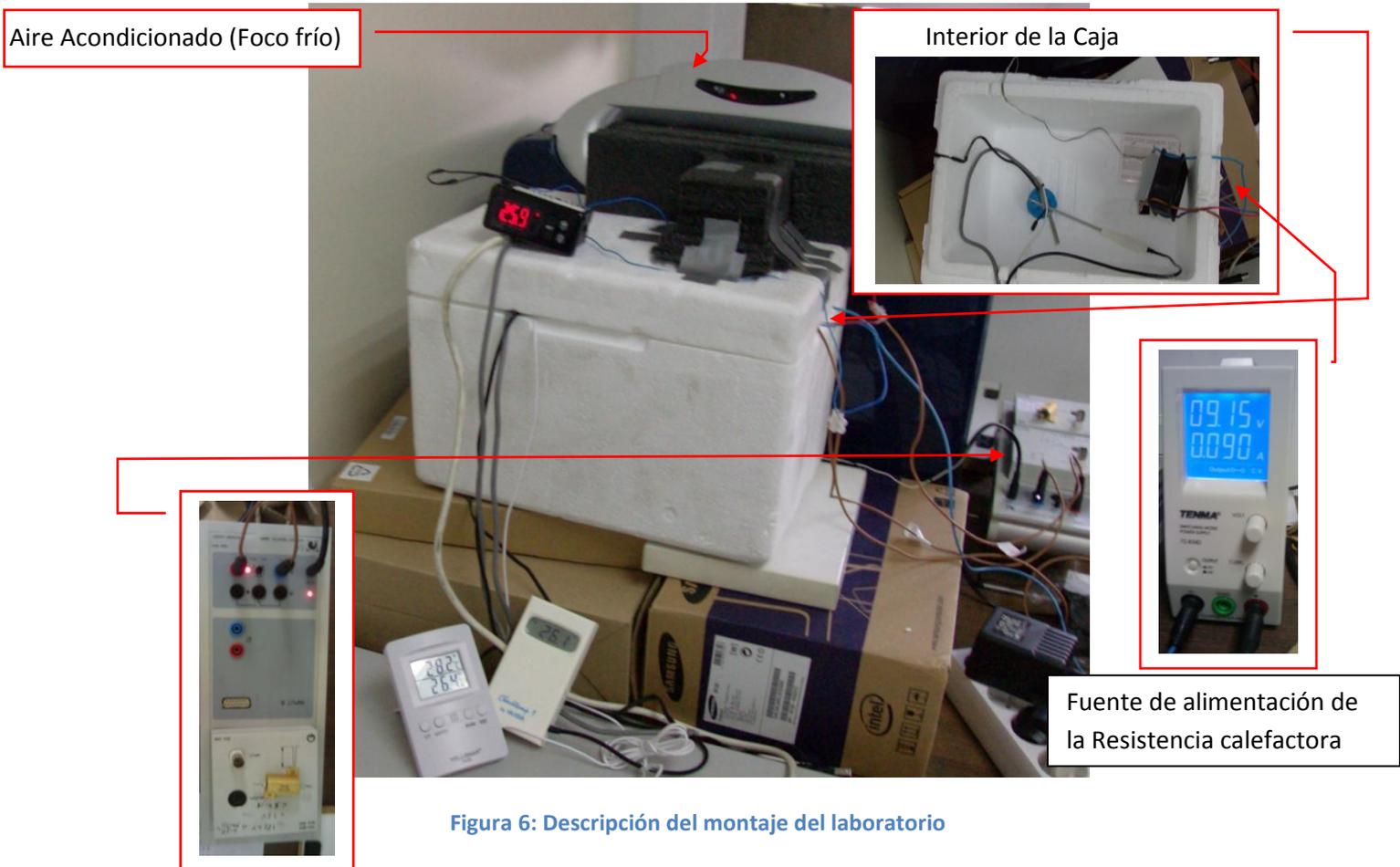


Figura 5: Material Utilizado en el montaje del laboratorio

La caja tiene unas dimensiones aproximadas de 32 (alto) 16 (ancho) 16 (largo) cm, en la estabilizaremos la temperatura entre un foco caliente formado por una resistencia (100 Ω) y una fuente de tensión continua (contando hasta con 50 V), la cuales disipan calor (hasta un máximo de 25 W), un ventilador para distribuir la temperatura en la caja de una forma uniforme (para este fin, introduciremos a posteriori un filtro de cartón). Como foco frío del sistema utilizamos el aire acondicionado del laboratorio que cuenta con 2500 frigorías/hora. Dicho foco frío nos aporta la suficiente refrigeración para hacer descender la temperatura dentro de un rango de operación ambiente, entre 15 y 45 $^{\circ}\text{C}$.



Durante la realización de este trabajo fue necesario incluir un elemento de control de la temperatura entre el montaje resistencia-ventilador y las sondas de los termómetros. El elemento en cuestión es una pared de cartón perforado, a modo de filtro, que permite alcanzar un equilibrio térmico homogéneo en la parte de estudio de la caja.



Figura 7: Pared de cartón perforada

Dicha introducción permite que la difusividad térmica dentro de la caja permanezca constante evitando gradientes térmicos en la misma.

Presentación de las primeras medidas y configuraciones de medición

Primero caracterizaremos la resistencia frente a la temperatura por medio de una resistencia variable con la temperatura, de tipo PTC (Positive Temperature Coeficient) o NTC (Negative Temperature Coeficient). En ambas el valor óhmico de este tipo de resistencias depende de la temperatura, siendo directa o inversamente proporcionales a la misma.

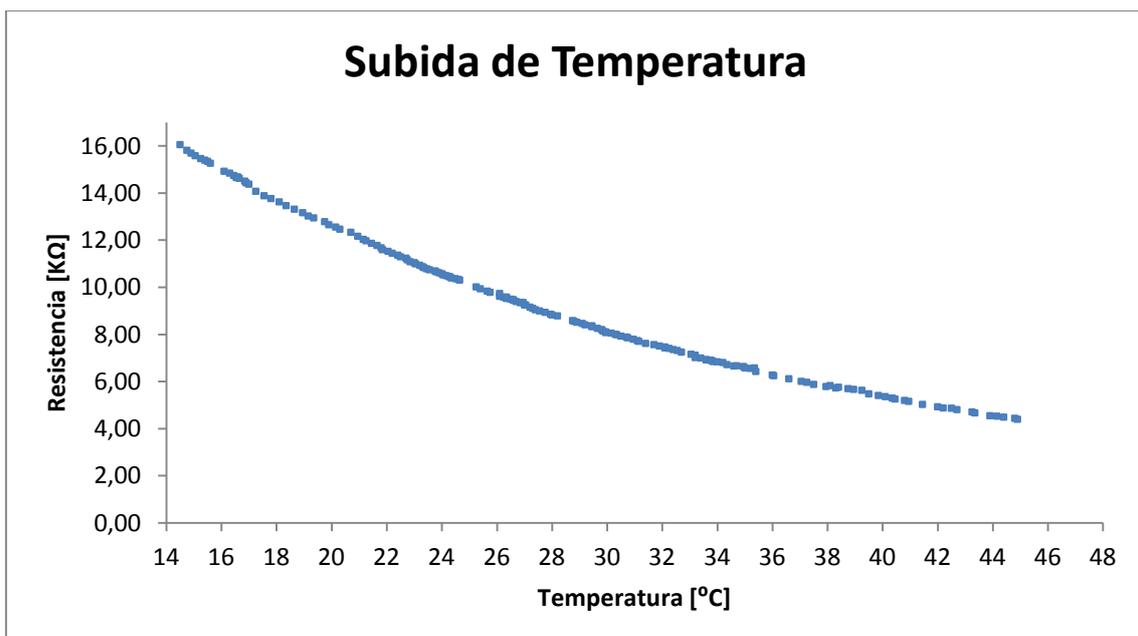


Figura 8: Curva de caracterización de la resistencia Subiendo la Temperatura

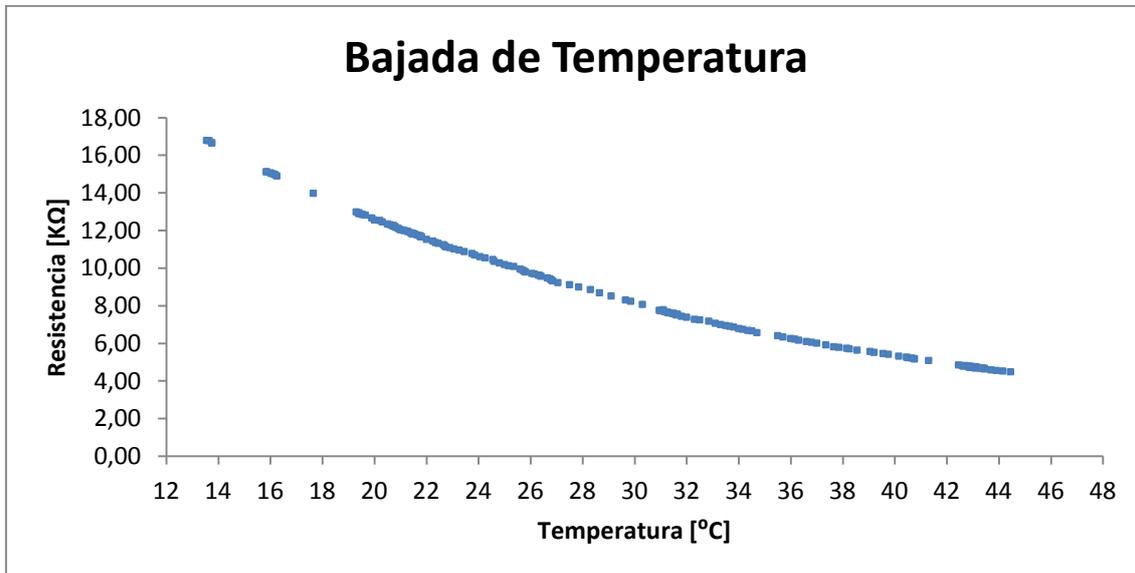


Figura 9: Curva de caracterización de la resistencia Bajando la Temperatura

Como se aprecia, se trata de una resistencia NTC, ya que al aumentar la temperatura disminuye la resistencia.

Podremos calcular el gap del semiconductor utilizado en dicha resistencia, por medio de su expresión de la conductividad:

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \quad \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{R \cdot S}$$

Teniendo en cuenta que nos encontramos en la región intrínseca o de alta temperatura (donde se equiparan las densidades de ambos portadores)

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p) = qn_i(\mu_n + \mu_p) \cdot \left(\frac{T}{300K}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{m_n^*}{m_n}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{m_p^*}{m_p}\right)^{3/4} e^{\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)}$$

Tomando logaritmos en esta expresión obtendremos una expresión del tipo:

$$\ln(1/R) = \ln(cte) - \frac{E_g}{2k_B} \cdot \frac{1}{T}$$

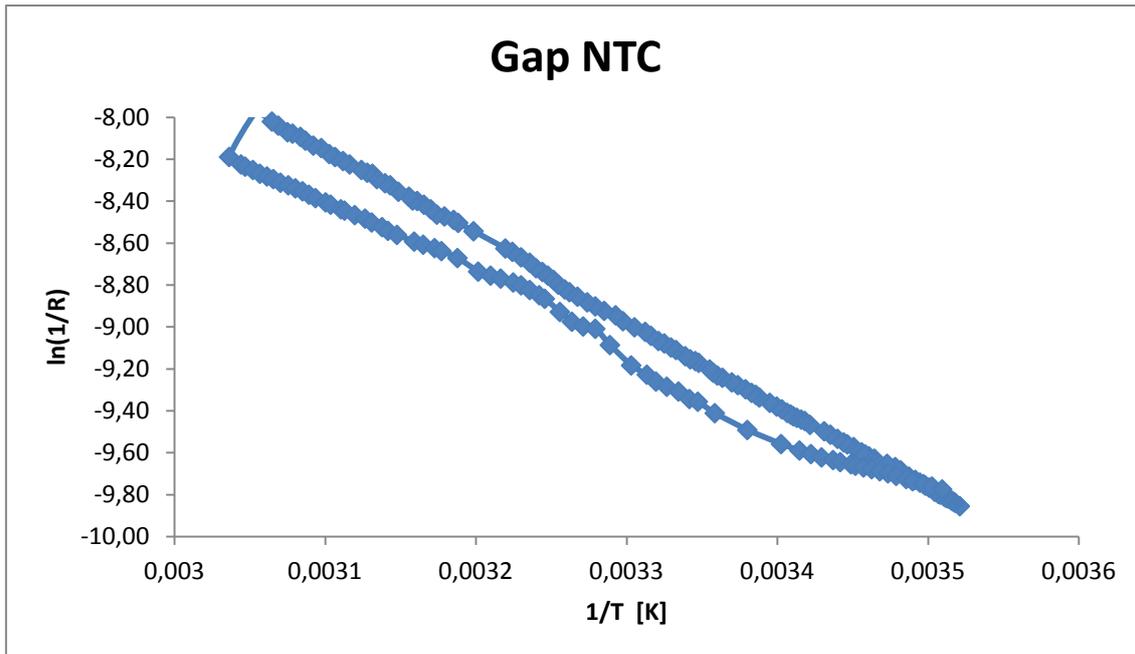


Figura 10: Representación de $\ln(1/R)$ frente a $(1/T)$ para el cálculo del GAP del semiconductor

Por medio de un ajuste lineal y utilizando la pendiente del mismo, podremos obtener el GAP de dicho semiconductor:

$$E_g = -2k_B \times m = -2 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot (-3746,52) = 0,65 \text{ eV}$$

Según este resultado del GAP de este semiconductor probablemente se trate del Germanio.

Respecto a las sondas de temperatura, según las especificaciones del fabricante el error relativo intrínseco de las sondas de temperatura (AKO y Velleman) es de 0,4 y 1°C respectivamente; de este modo, conocidos estos errores podremos estimar el error relativo de nuestra temperatura media, se puede expresar como:

$$(\Delta T_{media})^2 = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial T_{AKO}} \right) \cdot \Delta T_{AKO} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial T}{\partial T_{Velleman}} \right) \cdot \Delta T_{Velleman} \right]^2$$

$$\Delta T_{media} = \frac{1}{2} \sqrt{[\Delta T_{AKO}]^2 + [\Delta T_{Velleman}]^2} = 0,5 \text{ °C}$$

Con el fin de comprobar si hubiera cualquier tipo de efecto de histéresis (tendencia de un material a conservar sus propiedades en ausencia de estímulo externo) debido a las medidas de temperatura con diferentes termómetros, realizamos dos configuraciones para esta medición de temperatura: subiendo y bajando la temperatura.

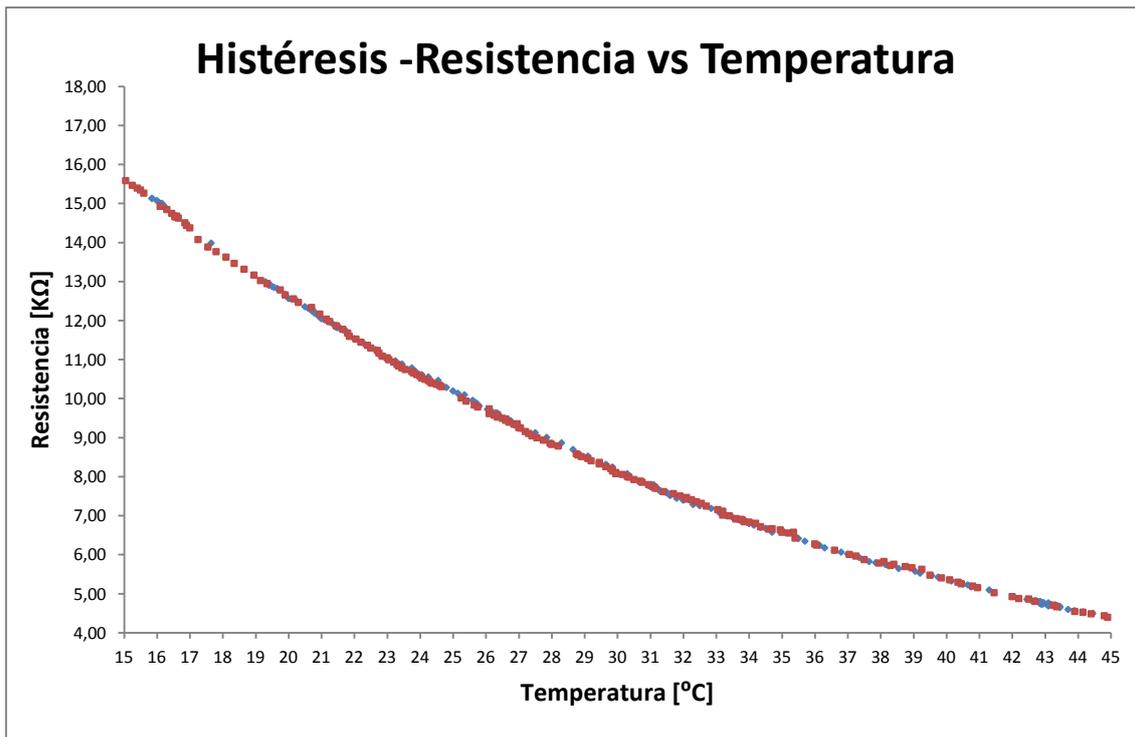


Figura 11: Curva de Histéresis de la Resistencia frente a la Temperatura

Para este cálculo de histéresis bastará con calcular el área encerrada por ambas curvas (bajada-subida), de acuerdo con los ajustes realizados en dichas curva:

- Subida (rojo): $R = 29,58 \cdot e^{-0,0428 \cdot T}$
- Bajada (azul) $R = 29,70 \cdot e^{-0,0429 \cdot T}$

$$A = \int_{R_{Subida}}^{R_{Bajada}} \int_{T_1}^{T_2} dT dR$$

$$A = \int_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} 29,70 \cdot e^{-0,0429 \cdot T} dT - \int_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} 29,58 \cdot e^{-0,0428 \cdot T} dT$$

$$= \left(\frac{29,70}{-0,0429} \right) \cdot e^{-0,0429 \cdot T} \Big|_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} - \left(\frac{29,58}{-0,0428} \right) \cdot e^{-0,0428 \cdot T} \Big|_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}}$$

Aunque el área que encierra la curva de bajada de temperatura es mayor, al realizar la diferencia entre ambas áreas obtenemos una histéresis:

$$H = 0.307 \text{ k}\Omega \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Esta histéresis es menor que la esperada para nuestro rango de temperaturas [15-45], es decir, en una variación de 30°C, se puede estimar una histéresis media:

$$H_{media} = \frac{0.307 \text{ k}\Omega \text{ }^{\circ}\text{C}}{30^{\circ}\text{C}} = 0,01 \text{ k}\Omega$$

Este valor es del orden de la resolución de de nuestro multímetro, determinando que apenas existe histéresis apreciable a efectos prácticos. Este hecho confirma la posibilidad de controlar la temperatura dentro de la cámara climática en nuestro rango de temperaturas.

Como aplicación de la cámara climática, en el rango de temperaturas que pueden estudiarse, comprobaremos un modelo de termoresistencia lineal y otro exponencial para la NTC.

$$R(T)_{lineal} = -aT + b \quad R(T)_{exponencial} = Ce^{-dT}$$

En ambos modelos calcularemos el error entre estos ajustes y los resultados experimentales por medio de un montaje divisor de tensión, al cual aplicaremos tensión a la entrada del mismo y mediremos la variación de tensión de salida con la temperatura.

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R}{R + R(T)} \right)$$

De modo que variando las tensiones de entrada y la temperatura en la cámara climática podremos comprobar a precisión de nuestros modelos de termoresistencia comparándolos con los obtenidos en la caracterización anterior de la misma.

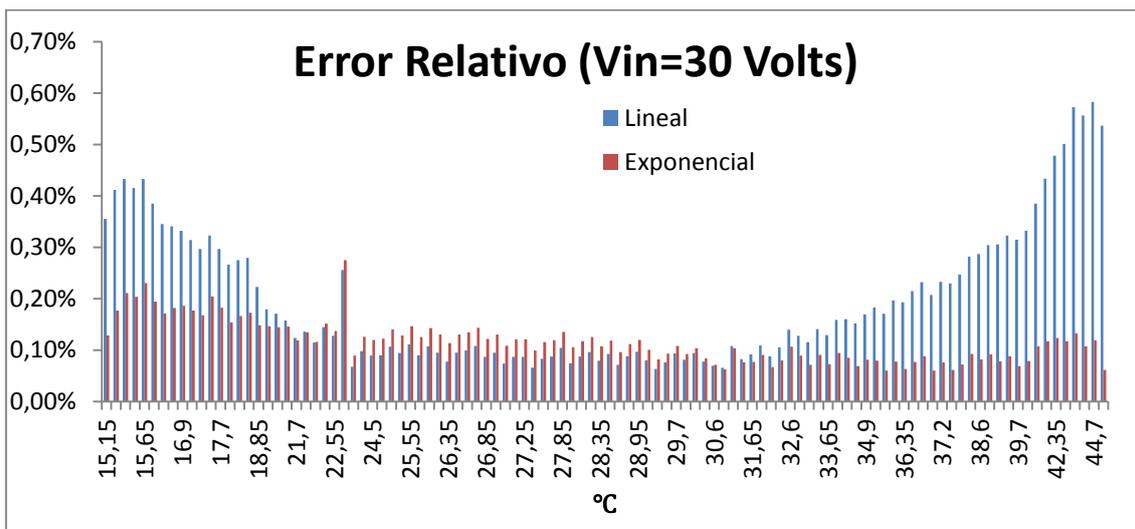


Figura 12: Diferencia de errores entre modelos lineal y exponencial para Vin=30 Volts

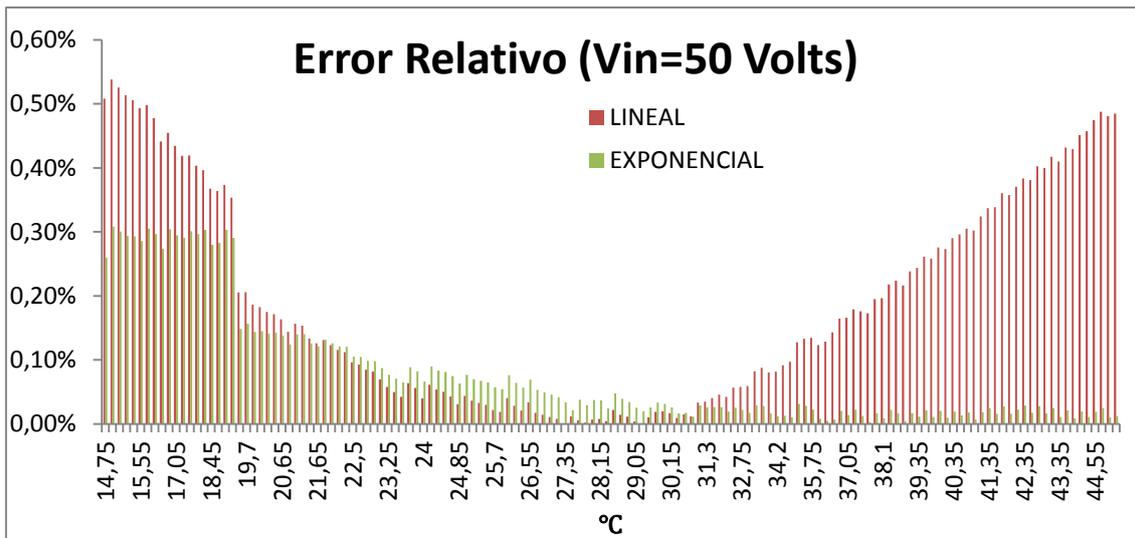


Figura 13: Diferencia de errores entre modelos lineal y exponencial para Vin=50 Volts

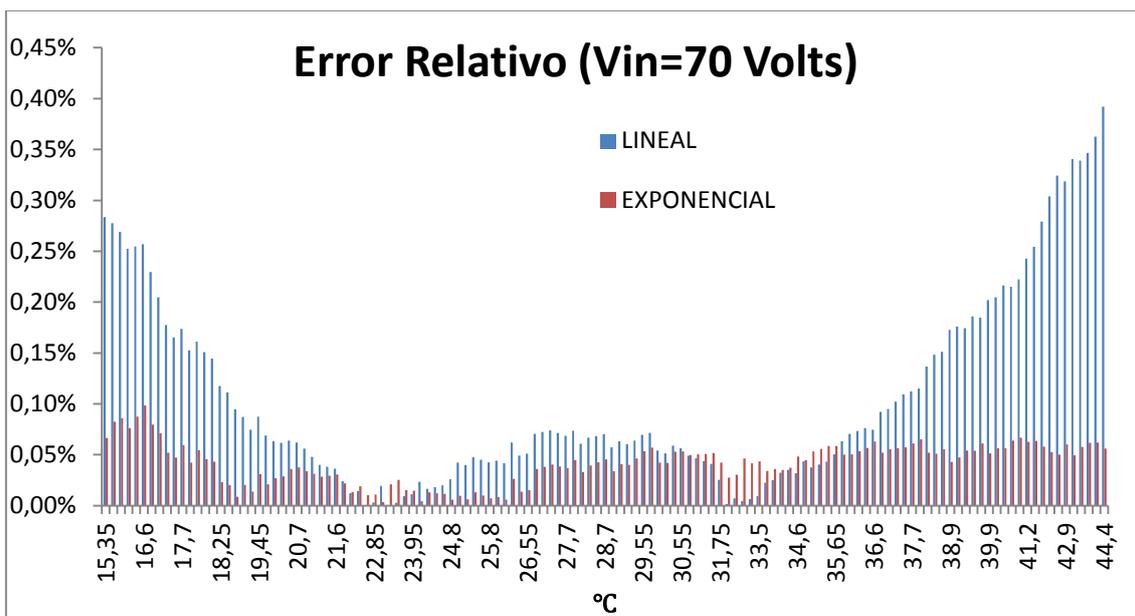


Figura 14: Diferencia de errores entre modelos lineal y exponencial para Vin=70 Volts

Como era de esperar, el modelo exponencial ajusta mejor los resultados experimentales obtenidos en la caracterización experimental de la termoresistencia para todo el intervalo de temperaturas.

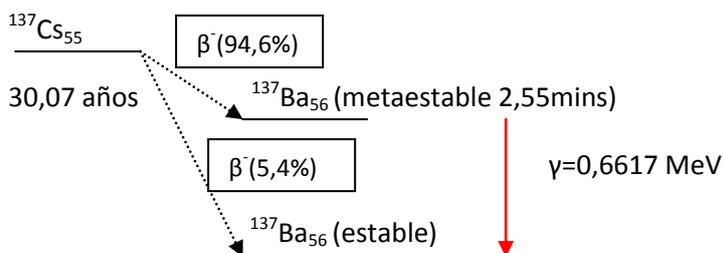
II. Medidas con una fuente de Cs 137

Ahora que hemos comprobado el buen funcionamiento de la cámara climática para las pruebas a distintas temperaturas, vamos a evaluar la variación del comportamiento de los SiPM (Modelo S10362-11-050 U/C (ref [5])) con la temperatura. Disponemos en el interior de la caja la fuente radioactiva con el dispositivo MPPC para tomar medidas sin ningún sistema de compensación de la variación de la ganancia del SiPM con la temperatura.



Figura 15: Montaje para la adquisición de medidas de la variación de la ganancia de los SiPM con la temperatura

Recordemos la desintegración radiactiva del $^{137}\text{Cs}_{55}$ y las gammas resultantes que detectaremos con nuestro montaje experimental:



Calculamos la actividad de la fuente, teniendo en cuenta que la semivida del ^{137}Cs son 30,07 años, que la fuente se adquirió en Agosto del año 2000 y las medidas se realizaron en Agosto del año 2011:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = 18500 \cdot e^{-11,00/43,38} = 14357 \text{ Bq}$$

El cristal centelleador colocado a previamente al SiPM y acoplado a él por medio de grasa óptica, presenta luminiscencia cuando se excita por la radiación incidente emitida por nuestra fuente de ^{137}Cs . De modo que el SiPM recibe fotones entorno a 428 nm (azul visible).

La señal del MPPC se lleva a un módulo MCA, que se encarga de digitalizar los pulsos analógicos, a continuación de este instrumento se coloca el Pocket Cassy que toma la señal del MCA y la manda al ordenador por medio de un puerto USB.



Figura 16: Adquisición de datos por medio del Módulo MCA y Pocket Cassy

El método de adquisición de datos se realiza por medio del programa CASSY LAB, durante estas mediciones se mantiene la ganancia electrónica del equipo de medida constante en una ventana de ajustes de dicho software.

Medidas de la variación del centroide del fotopico con la temperatura

Representamos cuatro espectros a diferentes temperaturas con nuestro interfaz de visualización, de modo que observamos:

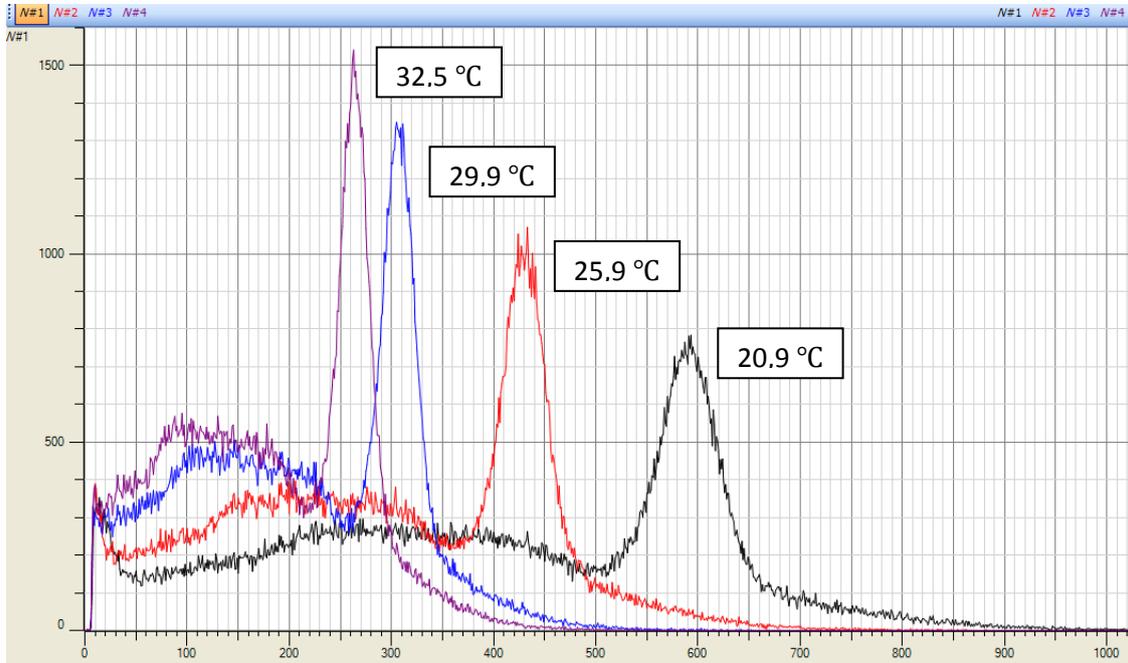


Figura 17: Espectros a diferentes temperaturas sin compensación

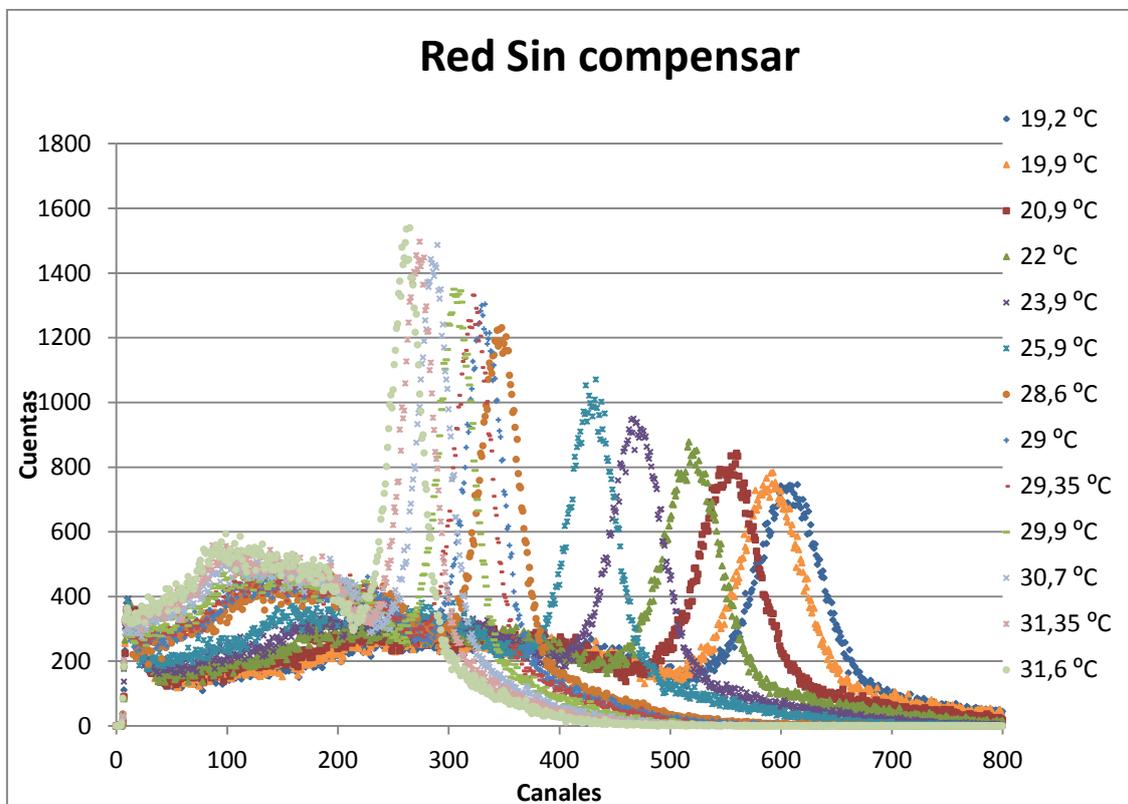


Figura 18: Espectros a todas las temperaturas medidas sin la red de compensación

Como se puede apreciar en esta última representación, se observa que según aumenta la temperaturas los picos se desplazan hacia canales menores aumentando la altura del pico, pero disminuyendo el ancho. Así el número de cuentas se mantiene aproximadamente constante.

Obteniendo las posiciones de los fotopicos (centroide) para diversas temperaturas a tensión constante obtenemos la variación de la ganancia, proporcional al número de canales, del SiPM (S10362-11-050 U/C) respecto a la temperatura.

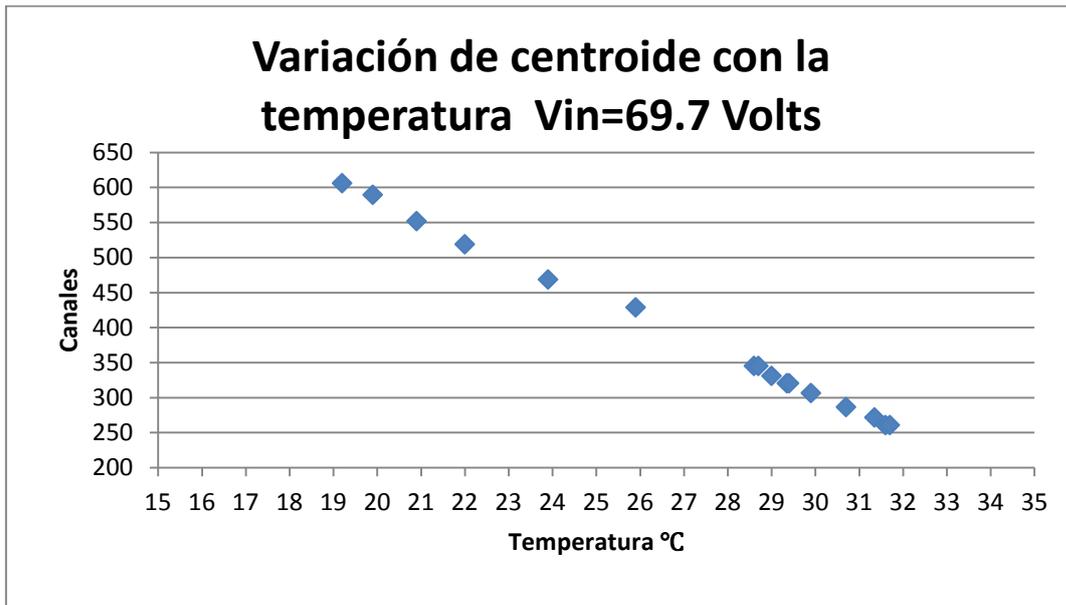


Figura 19: Variación del centroide con la temperatura sin red de compensación

$$\text{Centroide [canal]} = -27,6 \cdot T + 1.138$$

La dependencia de la temperatura de nuestro detector viene estimada en la ref[5], de modo que:

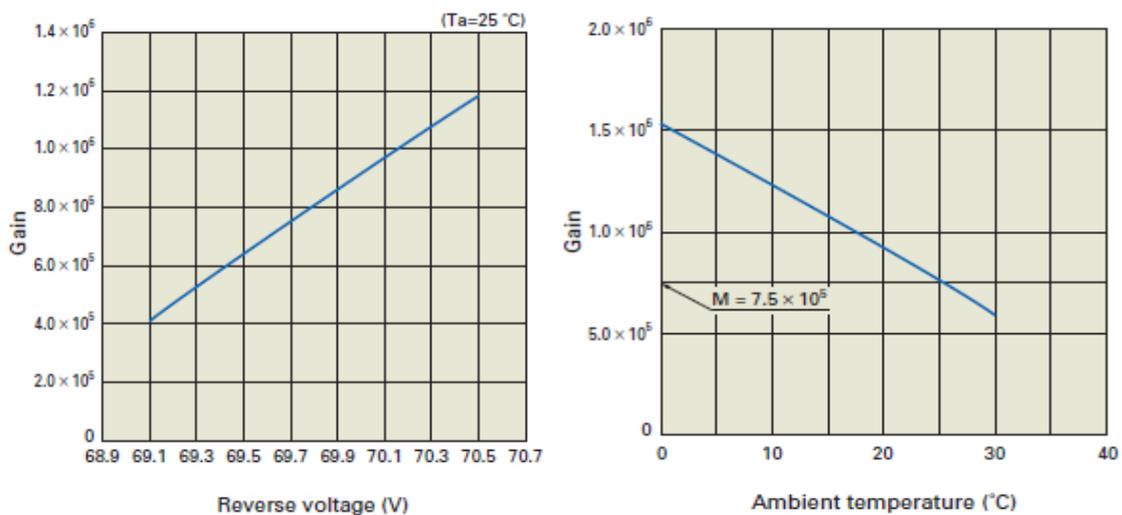


Figura 20: Datos de Ganancia frente a voltaje y temperatura (ref[5])

Con el valor de la ganancia a un voltaje inverso fijo (69.7 Volts) y la relación entre temperatura y ganancia de nuestro detector (SiPM - S10362-11-050 U/C) expresada en la figura 20, obtenemos una relación entre la ganancia y la temperatura:

$$G = -33.400 \cdot T + 1.603 \cdot 10^3$$

$$\Delta G = -33.400 \cdot \Delta T$$

Hemos realizado medidas experimentales de los canales con la temperatura (figura 19) manteniendo las mismas condiciones de tensión inversa que en los representados en la figura 20, por lo tanto, podremos relacionar por medio de un ajuste lineal la ganancia frente a la posición, en canales, del centroide para las mismas temperaturas.

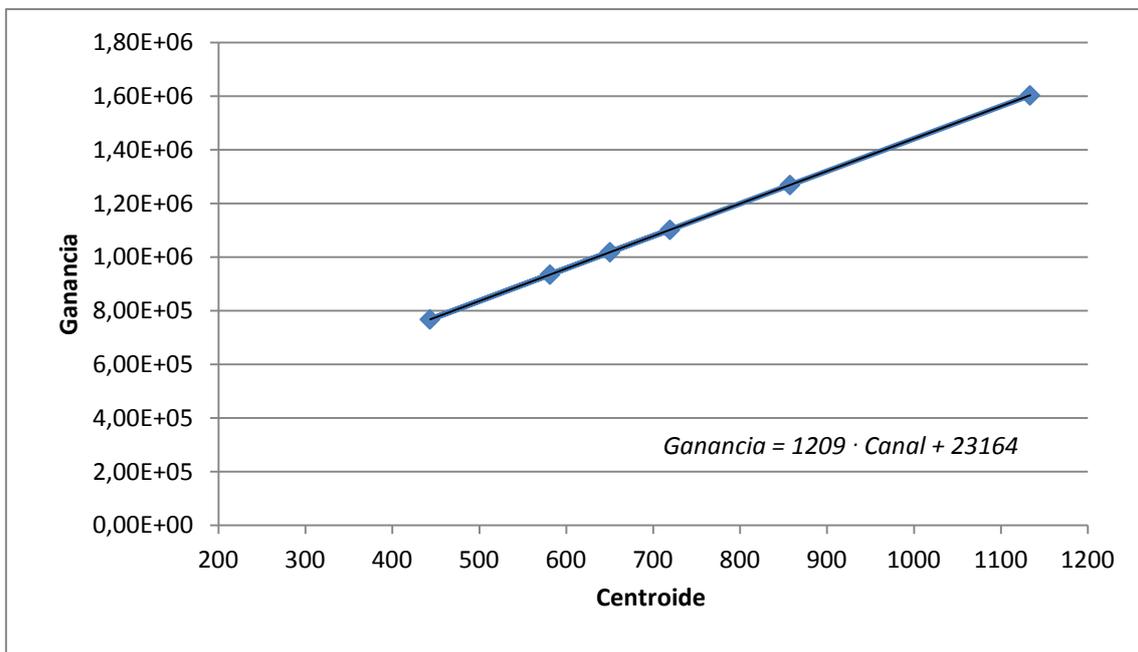


Figura 21: Datos de Ganancia respecto a la posición del centroide

De modo que el incremento que sufre la ganancia en un grado centígrado respecto a la ganancia a 25°C, obtenida en la figura 20, se calcula:

$$\frac{\Delta G}{G_{25^{\circ}\text{C}}} = \frac{1209 \cdot 27,6}{7,5 \cdot 10^5} = 4,45\%$$

A modo de comprobación, realizamos ahora la variación de la posición del centroide a 25°C de manera que nos mantengamos en la isoterma que relaciona ganancia y voltaje de la figura 20, cuando varía un grado la temperatura.

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_{25^{\circ}\text{C}}} = \frac{27,6}{448} = 6,16\%$$

Esta diferencia entre variaciones por grado de temperatura entre la ganancia y la posición del centroide nos indica que la relación ganancia posición del centroide no está centrada en el origen y existe un valor de ganancia por debajo del cual no hay canales. Este suceso nos indica que es necesaria una ganancia mínima ($G > 2,31 \cdot 10^5$) en el detector para observar esta variación en canales de la posición del centroide.

Medidas del centroide con la temperatura con red de compensación

Primera Configuración

En esta parte del trabajo comprobamos la eficacia de varios circuitos de compensación de la variación de la ganancia con la temperatura desarrollados por el GFN. Con una primera configuración y variando la temperatura obtenemos, siempre con la ganancia de la parte electrónica constante:

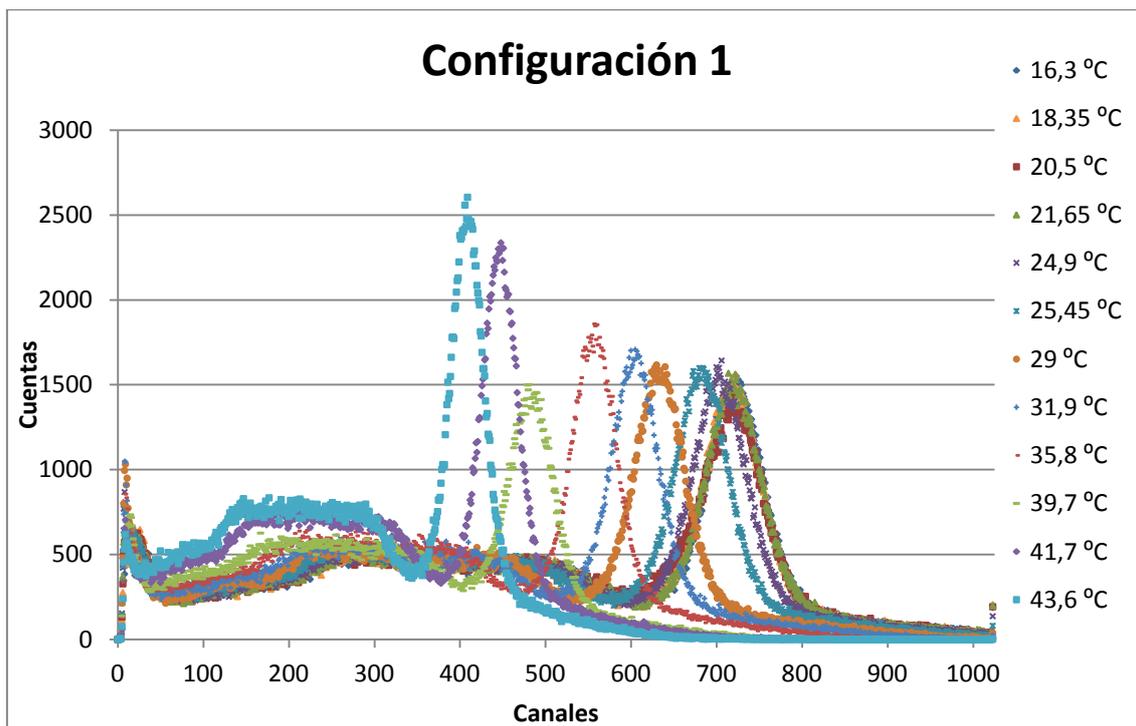


Figura 22: Variación del centroide con la temperatura en la configuración 1

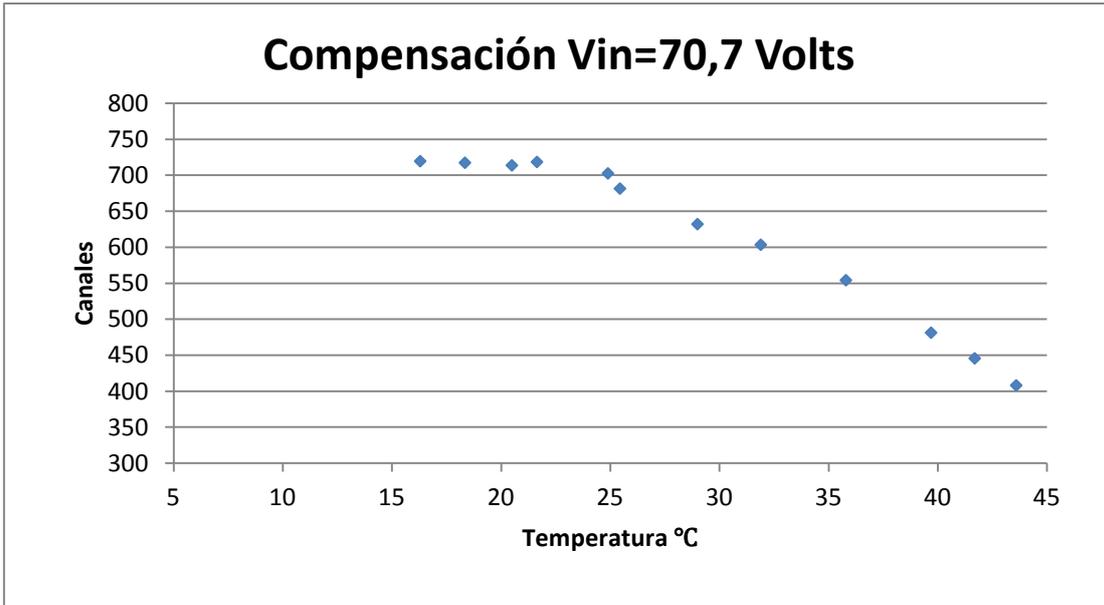


Figura 23: Posición del centroide con la red de compensación de ganancia en configuración 1

Esta primera configuración funciona bien entre 17 y 25 °C.

Probamos una segunda configuración:

Segunda Configuración

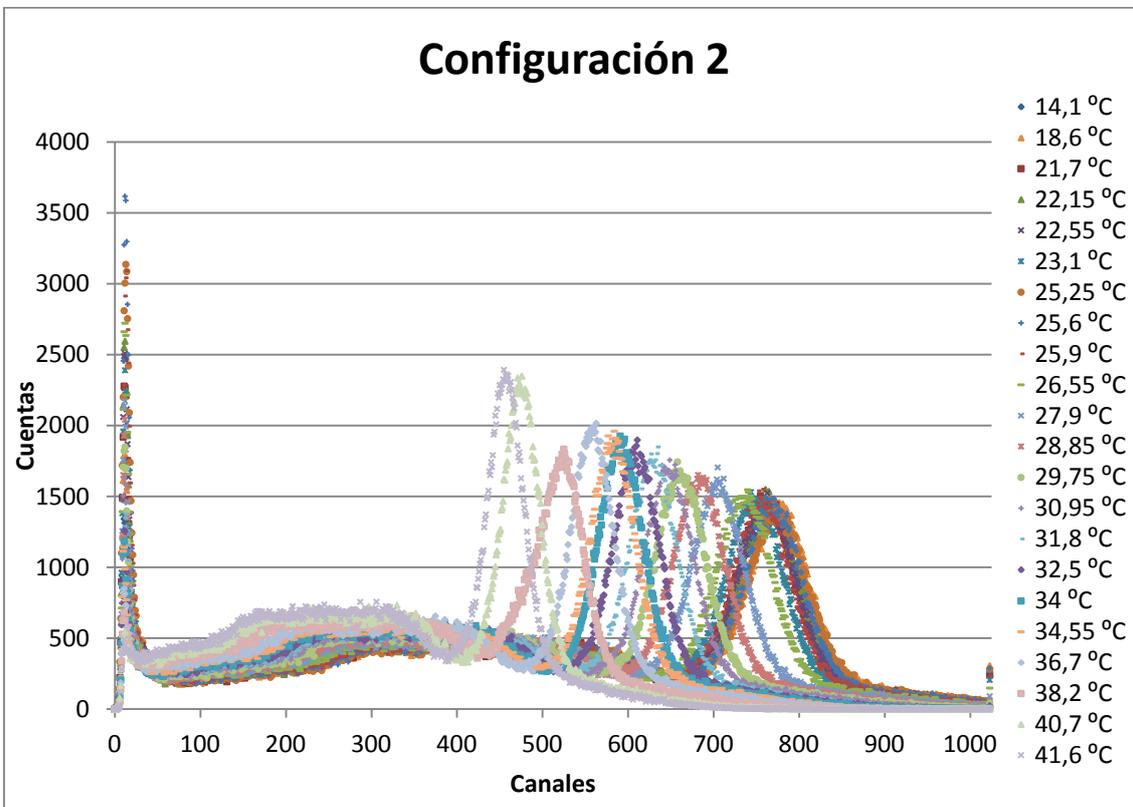


Figura 24: Variación de la posición del centroide con la temperatura en la configuración 2

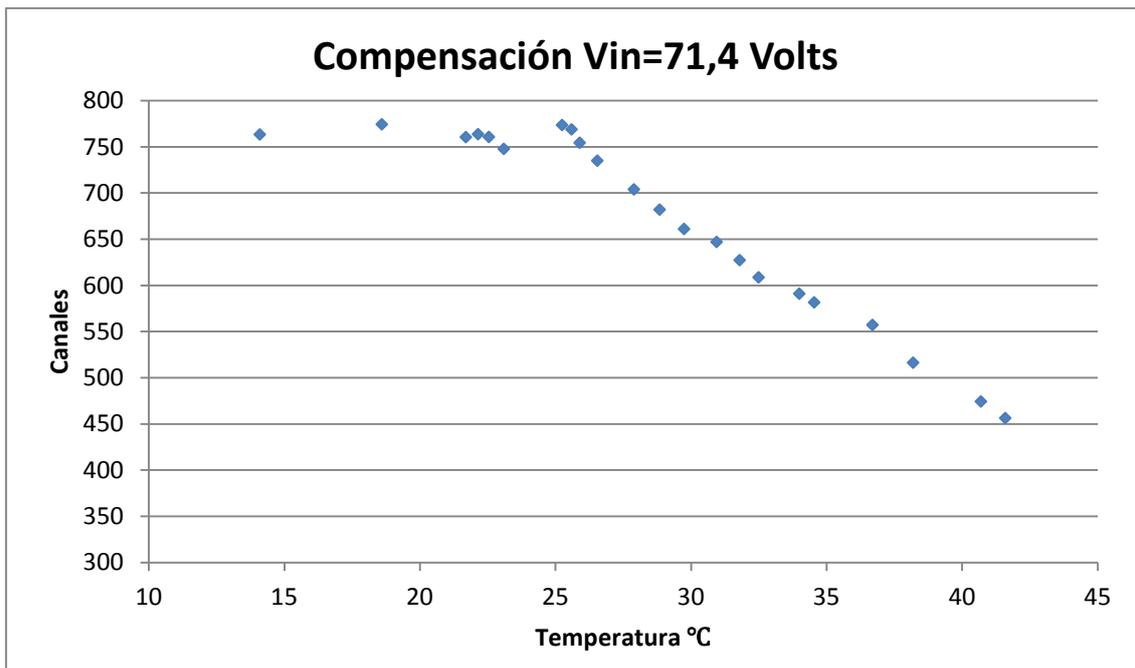


Figura 25: Resultados de la Red de Compensación en configuración 2

Como observamos para nuestras dos configuraciones, hay un punto en el que la ganancia deja de ser constante para reducirse de forma lineal la segunda configuración trabaja bien entre 14 y 25 °C.

Durante estas medidas con las redes de compensación es evidente que no se conserva el voltaje de polarización inversa ni la temperatura, de modo que no podremos relacionar ganancia y temperatura; pero el pulso de salida o carga obtenido por sistema de adquisición se conserva pudiendo afirmar que la ganancia sólo varía con la posición del centroide.

Primero calcularemos la variación de posición del centroide con la temperatura, y posteriormente relacionamos la ganancia respecto a la posición del centroide. De modo que:

Primera red de compensación:

$$\mu(T) = \begin{cases} T \leq 24,90^\circ\text{C} & \mu(T) = 717 \\ T > 24,90^\circ\text{C} & \mu(T) = -15 \cdot T + 1073 \end{cases}$$

$$G(T) = \begin{cases} T \leq 24,90^\circ\text{C} & G(T) = 8,67 \cdot 10^5 \\ T > 24,90^\circ\text{C} & G(T) = -1,81 \cdot 10^4 \cdot T + 129,73 \cdot 10^4 \end{cases}$$

Temp	16,15	18,35	21,65	24,90	29,80	31,90	35,80	39,70	41,70
G _{normalizada}	1,025	1,021	1,022	1,000	0,961	0,859	0,788	0,685	0,634

$$\frac{\Delta G}{G_{25^{\circ}\text{C}}} = \frac{1209 \cdot 15}{8,67 \cdot 10^5} = 2,09\%$$

Segunda red de compensación:

$$\mu(T) = \begin{cases} T \leq 25,25^{\circ}\text{C} & \mu(T) = 773 \\ T > 25,25^{\circ}\text{C} & \mu(T) = -19 \cdot T + 1235 \end{cases}$$

$$G(T) = \begin{cases} T \leq 25,25^{\circ}\text{C} & G(T) = 9,35 \cdot 10^5 \\ T > 25,25^{\circ}\text{C} & G(T) = -2,30 \cdot 10^4 \cdot T + 149,31 \cdot 10^4 \end{cases}$$

Temp	14,10	18,60	21,70	25,25	28,85	31,80	34,55	38,20	41,60
G _{normalizada}	0,987	1,002	0,984	1,000	0,882	0,811	0,752	0,668	0,590

$$\frac{\Delta G}{G_{25^{\circ}\text{C}}} = \frac{1209 \cdot 19}{9,35 \cdot 10^5} = 2,46\%$$

La diferencia entre las pendientes de los canales frente a la temperatura nos indica que la variación de ganancia con respecto a la temperatura con las redes de compensación resulta menos pronunciada que sin ellas, de modo que nuestro espectro será más compacto en el caso de incluir una red de compensación.

Tal y como hemos observado la ganancia con las redes de compensación permanecen estables hasta cierto valor de temperatura a partir de los cuales disminuyen de forma cuasi-lineal. En este rango deberemos realizar una compensación en ganancia digital por medio de las expresiones de ganancia frente a temperatura presentadas en este apartado.

Reescalado de las gráficas con red de compensación

Como se observa en las gráficas anteriores al aumentar la temperatura el fotopico del ^{137}Cs situado en 662 keV se desplaza hacia canales más bajos al aumentar la temperatura. Así que reescaleremos la altura del fotopico para detectar posibles variaciones del espectro compensado, con temperaturas comprendidas desde 14°C hasta 25°C aproximadamente.

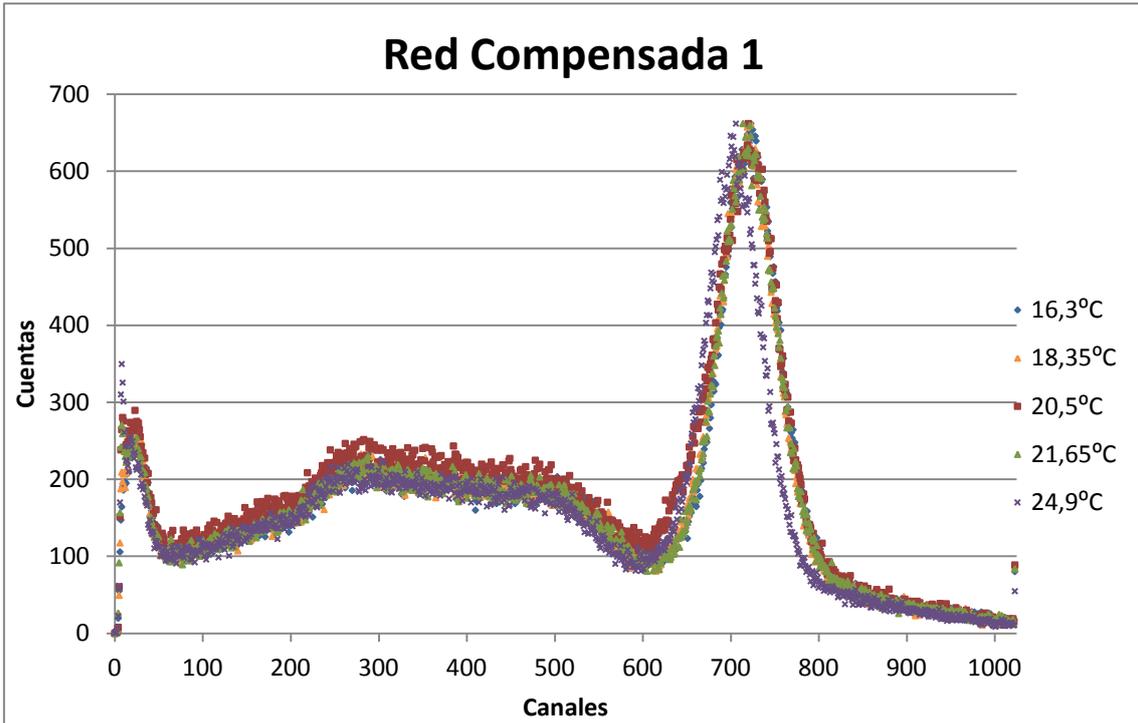


Figura 26: Red de Compensación 1 reescalada

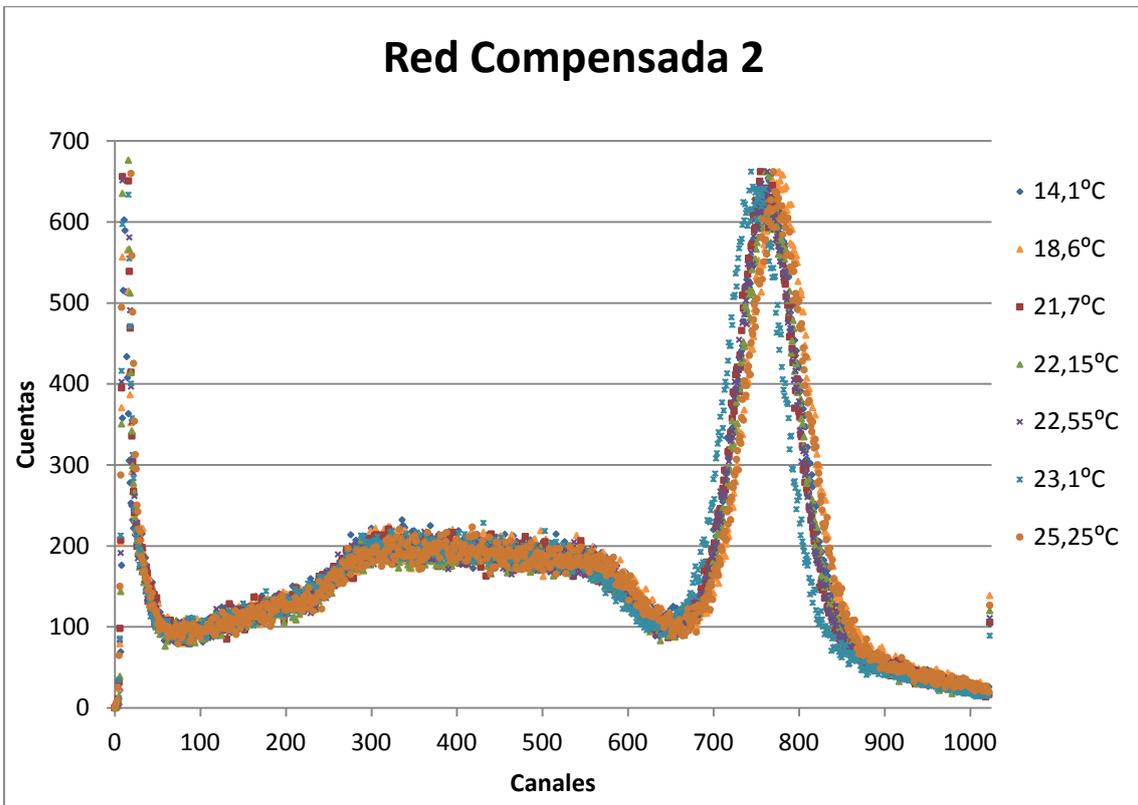


Figura 27: Red de Compensación 2 reescalada

Cabe mencionar que la anchura a media altura (FWHM) y el centroide del fotopico se mantienen constantes hasta cierto valor de la temperatura, en el cual la posición del centroide disminuye en canales a la vez que se reduce la FWHM de modo que la resolución de nuestro detector permanece constante.

$$R = \frac{FWHM}{\mu_0}$$

Al aumentar la temperatura, aumenta la altura del pulso en cada fotopico pero la forma del espectro permanece invariable manteniendo la resolución constante.

3. Conclusión

Durante este trabajo se ha llevado a cabo la evaluación de la eficacia de una cámara climática para estudiar el comportamiento de dispositivos con la temperatura. Con un sistema de control de temperatura sobre la misma.

Mediante dos focos térmicos y dos sondas comerciales de temperatura, se controla y mide una temperatura homogénea y se estabiliza la misma en el interior de la caja para llevar a cabo el experimento.

Comprobación de validez de los modelos de ajuste de la temperatura mediante un divisor de tensión.

Evaluación de la variación de la ganancia de los SiPM (S10362-11-050 U/C) con la temperatura con y sin red de compensación.

Como se observa en la parte final del trabajo se realiza una compensación parcial con la red probada, ya que sólo es efectiva hasta los 25°C (como demuestran las tablas del último apartado). Para temperaturas superiores cabe la posibilidad de realizar una compensación durante el tratamiento de los datos o etapa de ganancia digital. Esta caracterización puede ser muy útil en entornos de imagen médica PET y SPECT.

Referencias

- [1] Performance Evaluation of SiPM photodetectors for PET imaging in presence of magnetic fields (S.España, L.M. Fraile, J.L. Herraiz, J.M. Udías, M.Desco, J.J. Vaquero - NIM A)
- [2] Viabilidad del uso de fotodetectores Si PM en sistemas PET/IRM“(J.J. Vaquero, S. España, E. Picado, J. Cal-González³, L.M. Fraile, J.L. Herraiz³, E. Vicente, M.Desco^{1,5}, J.M. Udías)
- [3] Practical Nuclear Medicine - Peter F.Sharp,Howard G. Gemmell and Alison D.Murray – Third Edition
- [4] Three-Photon Annihilation of Electron Positron Pair (A.Ore and J.L. Powel, Physical Review, Vol 75,number 11)
- [5] Hamamatsu Manual, Technical Specifications for MPPC

El/la abajo firmante, matriculado en el Máster de Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Físicas, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo de Fin de Máster: “Caracterización de un montaje SiPM orientado a diversas aplicaciones”, realizado durante el curso académico 2011-2012 bajo la dirección de José Manuel Udías Molinero en el Departamento de Física Nuclear, y a la Biblioteca de la UCM a depositarla en el Archivo institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

La publicación en abierto tendrá un embargo de:

Tres años

FDO:

A handwritten signature in black ink, reading "Alberto Fernández Prieto". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping underline that loops back under the first part of the name. There is a small mark at the end of the signature, possibly a date or initials.