

Construcción y prueba de una cámara térmica para caracterizar un gamma-detector (SiPM)

Construction of a climatic chamber to test the thermal behavior of a SiPM detector

Keywords: SiPM, LYSO, Hamamatsu, Geiger Diode, Cassy-Lab

Palabras clave: SiPM, LYSO, Hamamatsu, Diodo Geiger, Cassy-Lab



Alumno: Luis Villarreal Ramírez - l.villarreal@estumail.ucm.es

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

Máster Interuniversitario de Física Nuclear (UCM)

Madrid, 26 Junio 2012

Índice

| | |
|--|--------|
| Resumen ----- | pag 3 |
| Objetivos del proyecto ----- | pag 4 |
| Abreviaturas. ----- | pag 4 |
| Introducción ----- | pag 4 |
| Fundamentos del diodo de avalancha ----- | pag5 |
| Equipos e Instrumentación ----- | pag6 |
| Método experimental ----- | pag 7 |
| a) <i>Montaje experimental</i> ----- | pag 7 |
| b) <i>Alcanzando una temperatura homogénea</i> ----- | pag 9 |
| c) <i>Manejo de la cámara climática</i> ----- | pag 11 |
| d) <i>Caracterización térmica de una resistencia NTC</i> ----- | pag 12 |
| e) <i>Gap de un semiconductor</i> ----- | pag 16 |
| Vout vs Temperatura ----- | pag 18 |
| Posición del pico de Cs-137 ----- | pag 20 |
| a) <i>Caracterización del SiPM</i> ----- | pag 20 |
| b) <i>Detector con compensación</i> ----- | pag 25 |
| Discusión de los resultados y Conclusiones ----- | pag 26 |
| Disposiciones Legales ----- | pag 28 |

Resumen:

Los SiPM (Silicio Photo-Multiplicador) son una nueva generación de detectores gamma que vienen a sustituir a los clásicos detectores fototubo; al ser casi insensibles al campo magnético, son un buen candidato para implementarlos en un escáner PET + NMR. Son de menor tamaño pero su ganancia tiene una fuerte dependencia con la temperatura, por lo que es necesario caracterizar bien sus prestaciones electrónicas ante fluctuaciones térmicas. En este trabajo vamos a intentar fabricar una cámara donde realizar experimentos a temperatura controlada. Trataremos de conseguir que la región donde se realiza el experimento tenga una temperatura homogénea. Podemos probar la cámara con un experimento sencillo, la caracterización térmica de una resistencia variable con la temperatura (NTC), para después introducir una fuente radioactiva de Cesio junto con un centelleador acoplado a un *SiPM* para ver cómo se comporta el espectro con la temperatura.

Summary:

The SiPMs (Silicon Photo-Multiplier) are a new generation of gamma-detectors which will substitute classic phototubes; as they are insensitive to magnetic fields, they are a good choice to implement PET + NMR scanners. A SiPM is smaller than a regular gamma-detector but its gain has a strong dependence on temperature, so we need to describe well its electronic performance against thermal fluctuations. In this project, we will attempt to make a climatic chamber where controlled ambient conditions can be performed. We will try to get a homogeneous temperature at the experimental region. Once accomplished this objective, we can test the camera with a simple experiment: the thermal characterization of a semiconductor resistance (NTC); then we will join a Hamamatsu SiPM to a scintillator and Cesium radioactive source and make temperature changes and study the variation of the measured Cs-spectrum with temperature.

Objetivos del proyecto

1. Construir una cámara climática para desarrollar en su interior experimentos a temperatura controlada.
2. Caracterizar la variación con la temperatura de la ganancia de un detector **SiPM**: *Hamamatsu S10362-11-050U/C*
3. Comprobar los compensadores de ganancia diseñados por el Grupo de Física Nuclear UCM para este detector.

Abreviaturas utilizadas en este documento (por orden de aparición)

- **SiPM**: Foto Multiplicador de Silicio
- **MPPC**: MultiPixel Photon Counter
- **APD**: Fotodiodo de Avalancha
- **ZCE**: Zona de Carga Espacial
- **PET**: Tomografía por Emisión de Positrones
- **LYSO**: Cristal de Lutecio-Yodo-Azufre-Oxígeno
- **NTC**: Termo resistencia de Coeficiente Negativo con la Temperatura
- **NMR**: Resonancia Nuclear Magnética

Introducción

MPPC es el acrónimo de Multi-Pixel Photon Counter: es un dispositivo compuesto de muchos pixels **APD** (Avalanche PhotDiode, ver figura 1) conectados en paralelo por un sustrato de silicio en la parte trasera, y una capa de metal en el lado frontal. Cada micropíxel opera en modo Geiger, esto es, alimentado en inversa con un potencial ligeramente mayor que la tensión de ruptura. En este modo se pueden alcanzar ganancias del orden de $10^5 \sim 10^6$

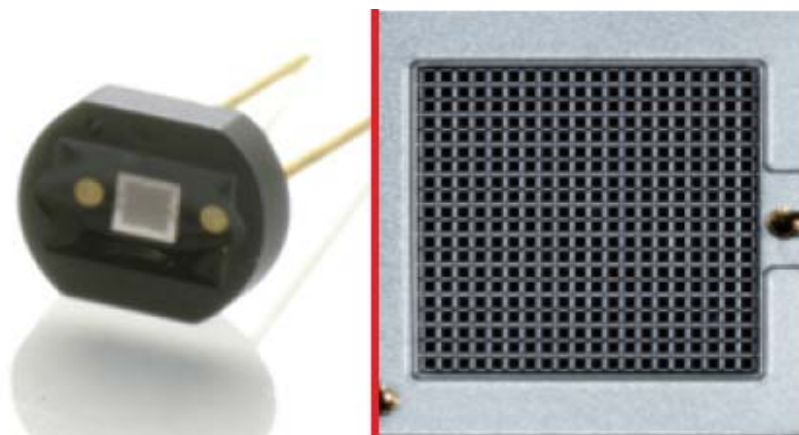


Figura 1: Vista de un detector MPPC y detalle de los fotodiodos¹

¹ *Hamamatsu's Technical Specifications for Multi-Pixel-Photon-Counter™*

Cada micropíxel opera como un diodo en inversa:

La unión P-N crea una Zona de Carga Espacial, una región microscópica donde tenemos la misma densidad de portadores de carga en la banda de conducción y en la de valencia; cuando un fotón emitido por un cristal centellador pasa por la **ZCE** se crea cierta cantidad de pares electrón-hueco proporcional a la energía del fotón. Los pares así creados son acelerados por el potencial externo generando una pequeña corriente, que habrá de pasar por un amplificador para ser detectada y medida.

Fundamentos del fotodiodo de avalancha:

Cuando un par electrón-hueco creado en la **ZCE es acelerado por el voltaje externo**, pueden generar más portadores generando una avalancha. La velocidad de arrastre de ese par $e^- - h^+$ depende del campo eléctrico aplicado; debido a fricciones, pérdidas y choques con la red cristalina la velocidad de arrastre llega a un tope: esos choques pueden generar más portadores arrancando electrones de la banda de valencia del cristal. Durante la avalancha, algunos portadores pueden quedar atrapados en impurezas dopantes u otros defectos de la red, cuyos pozos de potencial actúan como trampas de portadores. En tal caso es posible que el portador emita ese exceso de energía, en forma de fotón, cayendo a un nivel más profundo en el pozo; ese fotón puede generar a su vez más parejas de portadores².

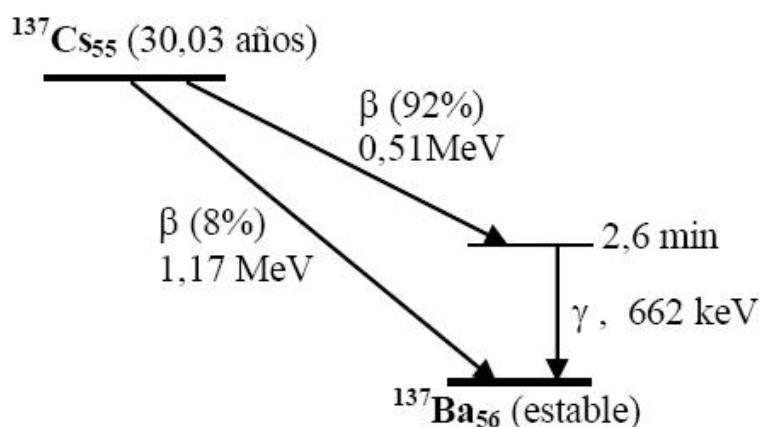
El **SiPM** es un tipo de detector gamma que no necesita fototubo, lo que le da dos ventajas sobre los detectores gamma tradicionales (y un inconveniente): Como no necesita de fotomultiplicador se pueden fabricar detectores-gamma de menores dimensiones, aparte de que no se verá afectado por los campos magnéticos. Esta insensibilidad al campo magnético convierte al **SiPM** en un buen candidato para ser utilizado en las técnicas que aún en **PET** y **NMR**.

Pero al ser un semiconductor, sus prestaciones electrónicas tienen una fuerte dependencia con la temperatura y con el voltaje externo aplicado. Por ello es necesario caracterizar bien este tipo de detectores y conocer la respuesta frente a la temperatura de magnitudes tales como Ganancia y corriente oscura, aunque en este proyecto sólo se estudiará la variación de G con T a través del desplazamiento del pico de emisión del Cs-137 (662 KeV).

En este trabajo vamos a acoplar un *Hamamatsu* modelo **S10362-11-050U/C** a un cristal centellador de **LYSO**, lo alimentaremos con una tensión cercana a 70 V y tomaremos el espectro de una fuente de Cesio-137 para varias temperaturas en el rango 15 °C hasta 45 °C

² *Temperature and Bias Voltage dependence of the MPPC Detectors* – N.Dinu, C.Bazin, V.Chaumat, C.Cheikali, A.Para, Member, IEEE, V.Puill, C.Sylvia, J.F. Vagnucci

Diagrama de decaimiento



El Cesio-137 se desintegra en Bario-137 (excitado) emitiendo electrones de 512 KeV; pero es el Ba-137 el que, al desexcitarse, emite radiación gamma. Afortunadamente, los electrones no pueden atravesar la cobertura de plástico de la fuente e interferir en la señal del detector.

Figura 2: Esquema de desintegración del Cs-137

Equipo e instrumentación

1) Sondas térmicas/Termómetros/Medidores de Temperatura:

- Termostato **AKOCONTROL DARWIN H**: con un error de $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sonda **TA-20 (Velleman)** con un error de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Sonda **CheckTemp HI 98509** con un error de $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

2) Electrónica de precisión/Circuitos

- **MPPC modelo S10362-11-050U/C (Hamamatsu)**
- Preamplificador **VKA-BOX**
- Analizador de espectros **Pocket-CASSY** acoplado a un ordenador con software **CassyLab**
- Dos ventiladores de ordenador (admiten una alimentación de hasta 12V)
- Cables de resistencia despreciable
- Resistencia cementada de 100Ω (se cementa para potenciar la disipación de calor)
- Tres generadores de tensión variables, uno alimentará los dos ventiladores a 7V, otro aportará la potencia disipada en el foco caliente y el último alimentará el **MPPC modelo S10362-11-050U/C (Hamamatsu)** y el preamplificador **VKA-BOX**
- Termo Resistencia **NTC** para caracterizar

3) Equipo diverso para fabricar la cámara climática

- Caja de poliestireno expandido
- Espuma anti-shock de poliuretano (tronera y compuerta)
- Aire acondicionado portátil

Método experimental y caracterización de la resistencia NTC

a) Montaje experimental (inicial)

Como necesitamos tener temperaturas controladas y estables en el rango 15-45 °C, vamos a crear un habitáculo aislado térmicamente para realizar experimentos en su interior. Usaremos una caja de poliespán de $32\text{cm} \times 16\text{cm} \times 16\text{cm} \approx 8200\text{cm}^3$; la caja es de un material bastante aislante y lo suficientemente pequeña (tan sólo ocho litros) como para poder alcanzar y mantener cualquier temperatura en un margen de tiempo razonable. Dado que tenemos que alcanzar temperaturas por encima y por debajo de la temperatura ambiente, necesitaremos un foco caliente y un foco frío.

Nuestro foco caliente será una resistencia de unos $100\ \Omega$ conectada a un generador de corriente continua; el generador permite alimentar la resistencia disipadora con una tensión de hasta 50 voltios \rightarrow 25 vatios ó 21500 cal/h. Para distribuir mejor el calor, acoplamos la resistencia a un ventilador de ordenador (que acepta una alimentación de hasta 12V) conectado a un pequeño generador de corriente continua a 7V.

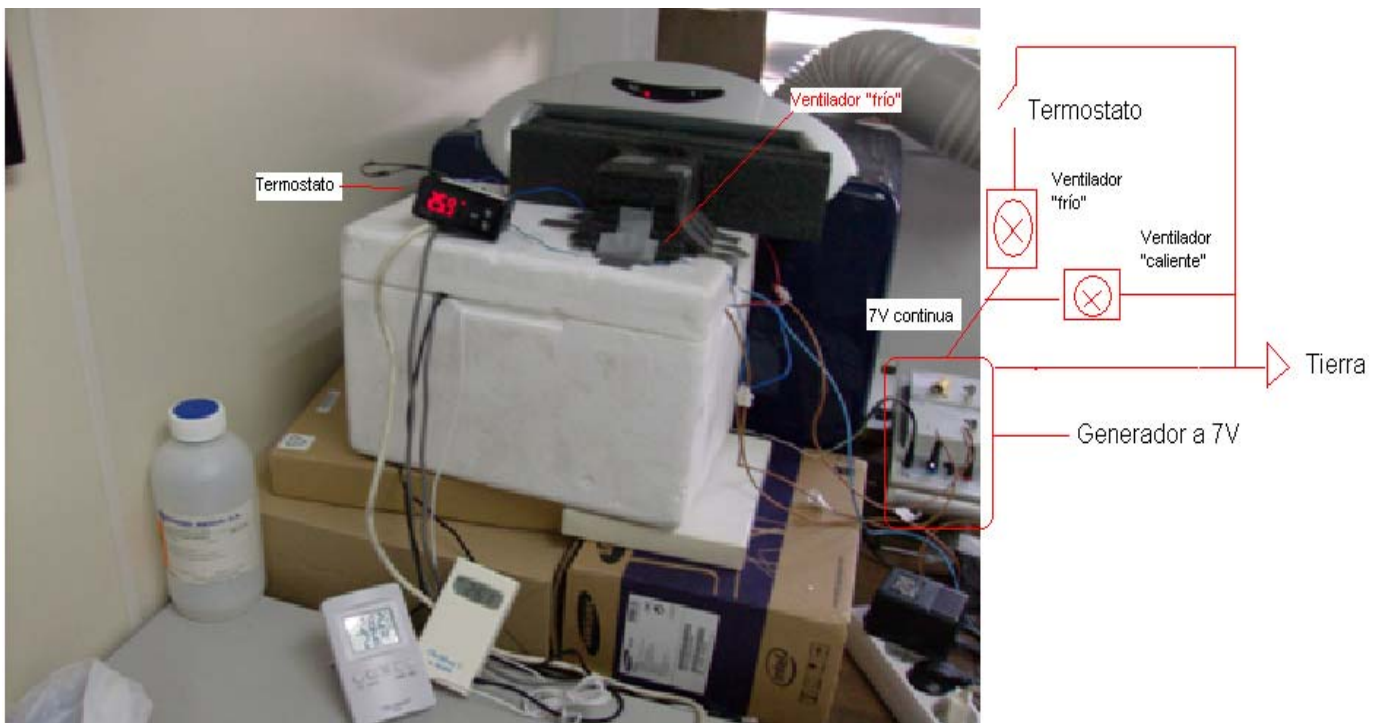
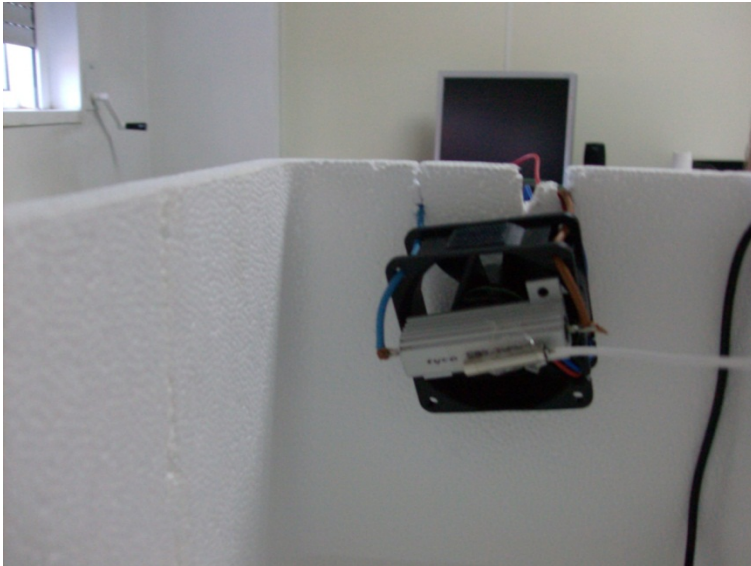


Figura 3: Vista general del montaje: Ventilador acoplado a la resistencia disipativa en el interior de la caja; colocamos otro ventilador en la abertura de la caja para ayudar a entrar al aire acondicionado. Se conecta en serie con el termostato para cortar la corriente cuando no necesitamos foco frío. Ambos, termostato y ventilador "frío" quedan conectados en paralelo con el ventilador interno, ya que éste último debe funcionar siempre.



En un principio, el ventilador y la resistencia reposaban en el suelo de la caja. La resistencia está acoplada al ventilador con un velcro adhesivo.

Al darnos cuenta que la resistencia podría llegar a los 100 °C tratamos de alejarla lo más posible del suelo de la caja, por si llegase a desprenderse (a esas temperaturas el pegamento se licúa).

Figura 4 (Foco caliente: Resistencia acoplada a un ventilador de 12 V)

El aire acondicionado del laboratorio funcionará como foco frío; tiene una capacidad de 2500 frigorías/hora, más que suficiente para enfriar quince grados los ocho litros de aire en un tiempo razonable (del orden de una hora). Tomando como materia prima la espuma anti-shock de un embalaje, damos forma a una tronera que encauzará el aire frío hacia el interior de la caja a través de una apertura en la tapa: Tiene una compuerta rudimentaria para aislar el conducto del exterior cuando no queramos que entre aire frío en la caja.

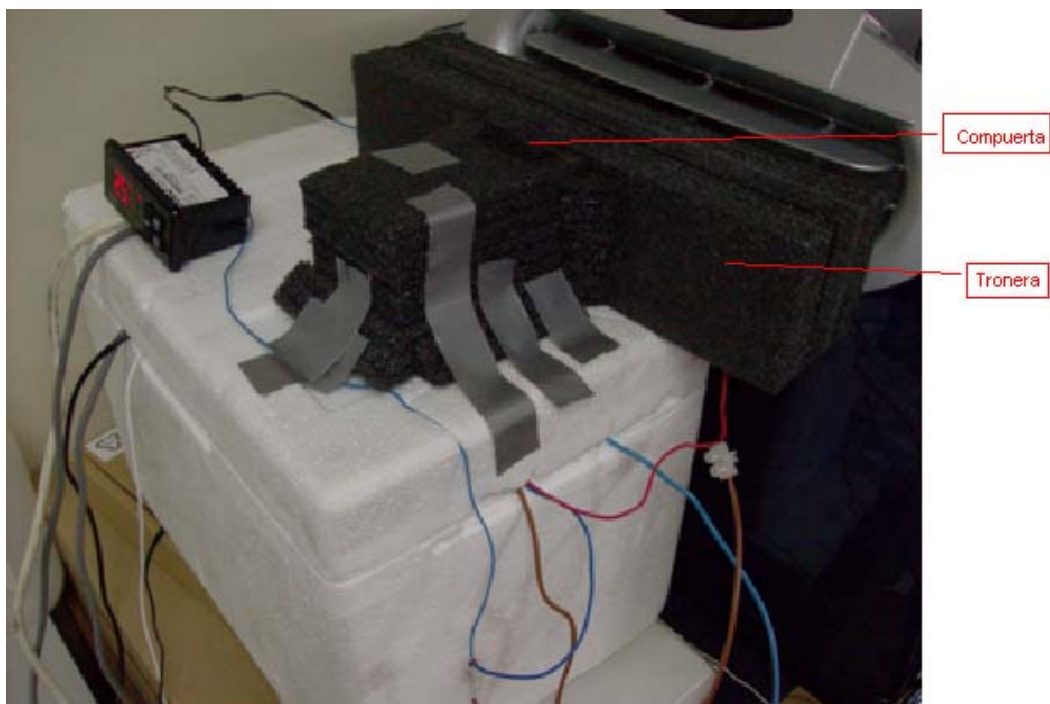
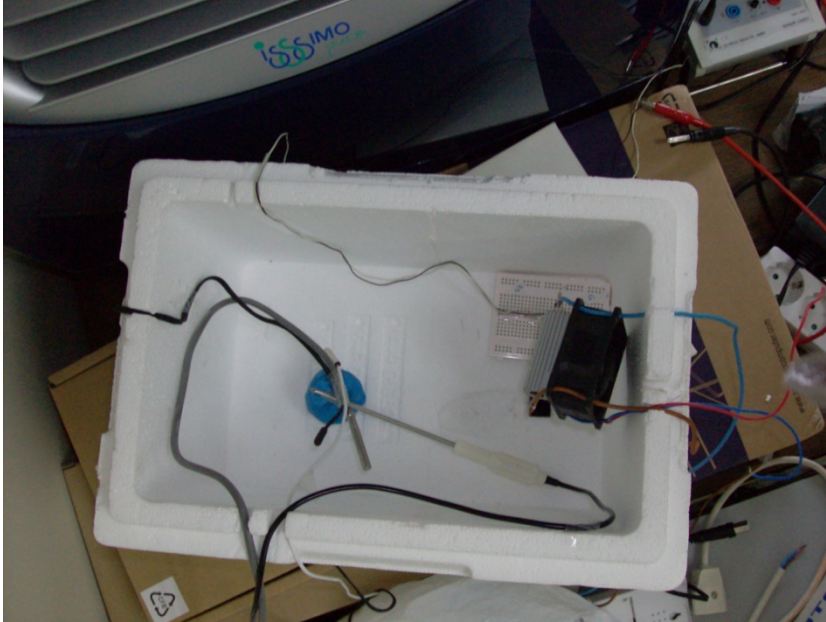


Figura 5: La tronera conecta el aire acondicionado con el interior de la caja

b) Alcanzando una temperatura homogénea (modificación de la cámara)

Tenemos tres sondas para medir la temperatura en el interior:

Primero calibraremos *AKO*, que es un termostato al que se le puede dar un desplazamiento arbitrario para todas sus lecturas; colocamos la sonda *AKO* lo más cerca posible de *CheckTemp*, que es la sonda más precisa.



Aplicamos únicamente el foco caliente y daremos al sistema mucho tiempo para alcanzar el equilibrio (1 h 30 min entre medida y medida), así garantizamos la mayor homogeneidad posible entre las temperaturas leídas por cada sonda.

Figura 6: Para calibrar la sonda AKO, colocamos las tres sondas en el mismo punto

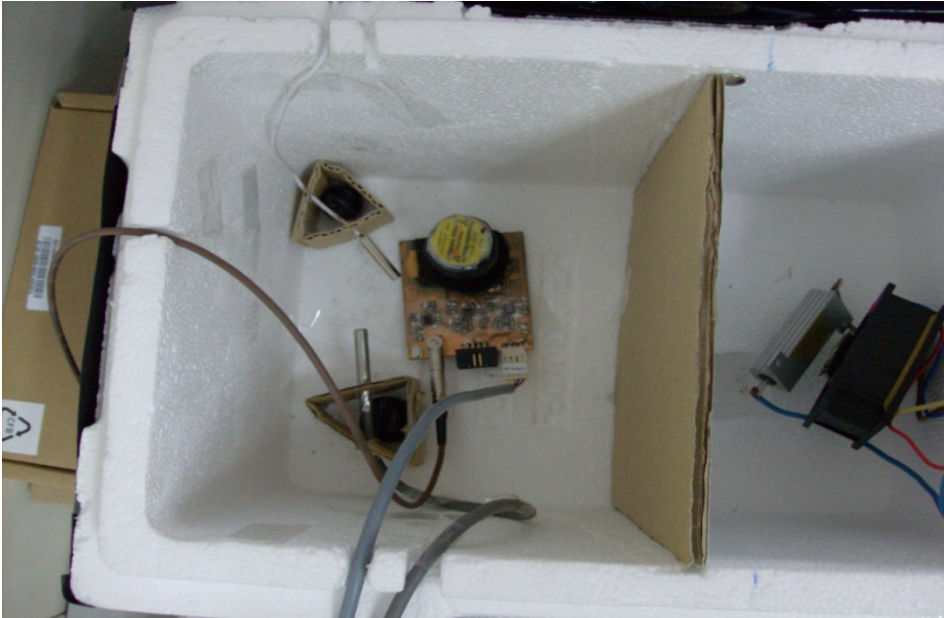
| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sonda CheckTemp (°C) | 27,5 | 33,8 | 34,5 | 39,5 | 40,6 | 43,5 | 46,4 |
| Termostato (°C) | 28,6 | 35,0 | 35,7 | 40,6 | 41,6 | 44,4 | 47,1 |

Ahora aplicamos el método de mínimos cuadrados para hallar la mejor calibración posible para el termostato:

$$\frac{d}{dx} \sum [(T_{AKO} + x) - T_{Check}]^2 = 0 \rightarrow \sum 2 \cdot [(T_{AKO} + x) - T_{Check}] = 0 \rightarrow 7x + 7.2 = 0 \rightarrow x = -1.03^{\circ}C$$

Con la sonda *AKO* calibrada (restando un grado a todas las lecturas), tratamos de corroborar que la distribución de temperatura es homogénea dentro de la caja colocando las tres sondas en sendas esquinas. La distribución de temperatura es homogénea cuando entra en juego tan sólo uno de los focos, la resistencia para temperaturas superiores a $T_{ambiente}$ ó el aire acondicionado para alcanzar los 12°C. Siempre que quisiéramos obtener una temperatura intermedia entre 12°C y $T_{ambiente}$, habrá que mezclar el aire caliente con el caudal de aire frío; esto da como resultado un régimen turbulento dentro del habitáculo: a pesar de llegar al régimen estacionario pasada una hora no se alcanza un campo homogéneo de temperaturas en el interior.

Hemos tenido lecturas de hasta 1.5 °C de diferencia entre las tres sondas, lo que no puede achacarse sólo al error sistemático de las sondas, sino a una diferencia real de temperatura de esquina a esquina de la caja. Estas turbulencias nos impedirían afirmar a qué temperatura se encuentra cualquier otro punto del interior de la caja que no coincida con las sondas, lo cual haría cualquier medida poco fiable. Nuestra solución fue colocar un filtro para separar el interior del habitáculo en dos: La zona turbulenta y la zona homogénea.



Detalle del habitáculo dividido por un filtro en dos zonas. A la izquierda la zona homogénea y a la derecha la zona turbulenta. La resistencia ha quedado despegada del velcro, es la razón por la que decidimos dejar el ventilador interno colgando de la pared en vez de reposar sobre el suelo.

Figura 7: Filtro que divide el habitáculo en zona turbulenta (dcha.) y zona homogénea (izda.)

El filtro se coloca de forma que el agujero por donde entra el aire acondicionado esté en la misma zona que la resistencia disipante; el filtro consiste en un cartón de embalaje con múltiples agujeros pequeños.

Descartamos la sonda *Checktemp* porque ya no cabe dentro de media caja. Con este sistema, conseguimos que en todo el rango de temperaturas, las lecturas de las otras dos sondas no se separan en más de 0.3 °C.

Por lo que podemos suponer que, dentro de nuestro margen de error, hemos conseguido una temperatura homogénea al otro lado del filtro.

Según la teoría de los errores sistemáticos³, el error total en la medida de una magnitud como es la T_{media}

$$T_{media} = f(T_{AKO}, T_{CheckTemp}) = \frac{T_{AKO} + T_{Checktemp}}{2}$$

$$\Delta T_{media} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial T_{media}}{\partial T_{AKO}} \cdot \Delta T_{AKO}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{media}}{\partial T_{Checktemp}} \cdot \Delta T_{Checktemp}\right)^2} = \pm 0.5 \text{ °C}$$

³ Carlos Sánchez del Río, *Análisis de errores*. Eudema Universidad (1989)

c) Manejo de la cámara termalizada

Hemos construido un equipo para realizar experimentos de temperatura controlada a base de material de embalaje, componentes de ordenador, termómetros comerciales y material de laboratorio como los generadores variables. Por tanto, la variable más controlada es la potencia disipada en el foco caliente, así que nos servirá para hacer el ajuste fino mientras la manipulación de las demás variables será más basta.

El aire acondicionado tiene unos “flaps” que podemos poner en dos posiciones, una de ellas es totalmente perpendicular a la boca de la tronera; fabricamos una compuerta para la tronera del mismo material que ésta. Manipulando ambas configuraciones podremos colocarnos en tres regiones de temperaturas:

1. Zona Fría: Entre 12 y 18 °C; abriremos la compuerta de la tronera y colocaremos los “flaps” de tal manera que el aire frío entre en una dirección perpendicular a ella. No haremos pasar ninguna corriente por la resistencia cementada. Como la Zona controlada (al otro lado del filtro) tarda mucho en sentir los cambios en la Zona turbulenta, habremos de esperar una hora a que alcance la temperatura mínima. Tomamos lecturas de temperatura cada 10/15 minutos hasta que los registros dejen de bajar; entonces podremos hacer la primera medida del experimento y empezar a subir la temperatura graduando el generador variable conectado a la resistencia disipante. Con esta configuración habremos de disipar mucha potencia para lograr pequeñas variaciones de temperatura.
2. Zona Templada: Abarca desde el final de la Zona Fría hasta la temperatura ambiente del laboratorio. Cuando en la configuración Fría hayamos llegado a nuestro tope de potencia (se recomienda no pasar de los 30 V = 9 W ya que la resistencia cementada se despegue de su ventilador), cerraremos la compuerta de la tronera y reduciremos la potencia a cero. La Zona Controlada (homogénea) tardará otra hora en alcanzar el equilibrio con su entorno; entendemos que se alcanza el equilibrio cuando las lecturas de los termómetros no varían durante 10 minutos. Cuando el generador llega al voltaje máximo, la temperatura queda en torno de la T_{ambiente} .
3. Zona Caliente: Llegados al final de la Zona Templada, manipularemos los “flaps” para desviar el aire que entraba por la tronera y reduciremos la potencia disipada (generador a unos 5 V = 0.25 W). Después de una hora veremos el equilibrio, aumentando la potencia podremos alcanzar temperaturas de unos 45 °C.

También hay una variable que no controlamos y cuya influencia es enorme: la temperatura ambiente del laboratorio. Dado que una decena de medidas pueden llevar un día entero, la temperatura del aire que está enfriando el aire acondicionado puede variar unos 10 grados en verano

d) Caracterización térmica de una resistencia NTC

Ya con la temperatura controlada, tratamos de comprobar si nuestra caja puede funcionar como cámara climática de condiciones térmicas controladas.

Vamos a usar una resistencia variable con la temperatura para caracterizarla, y pasar a continuación a integrarla en un divisor de potencial.

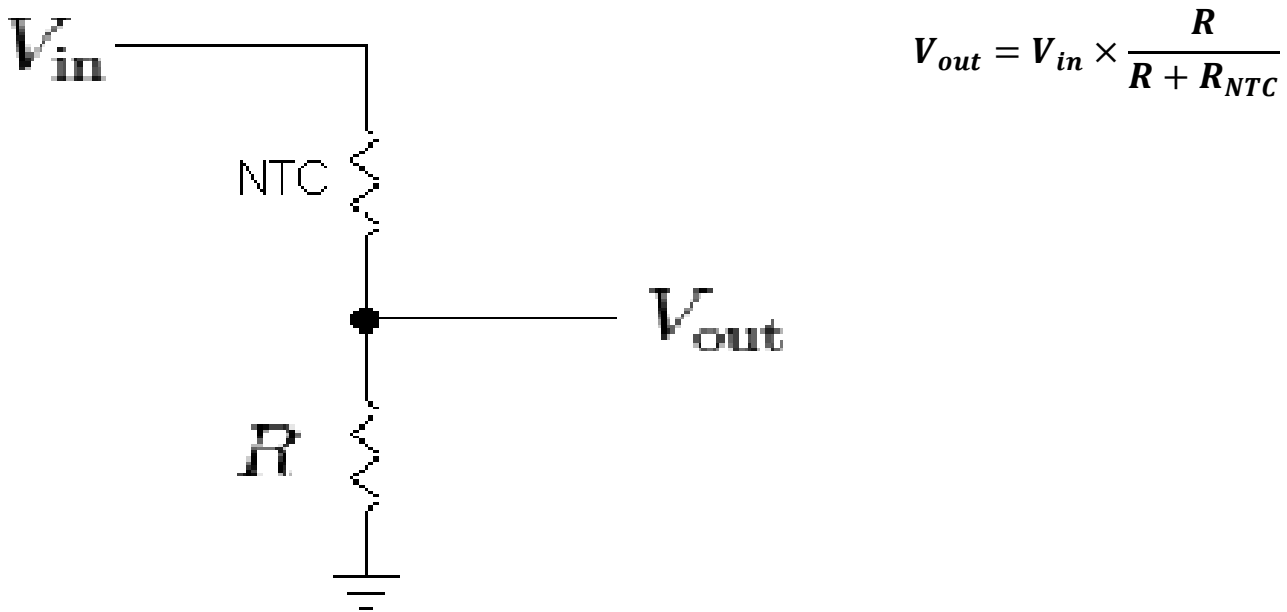


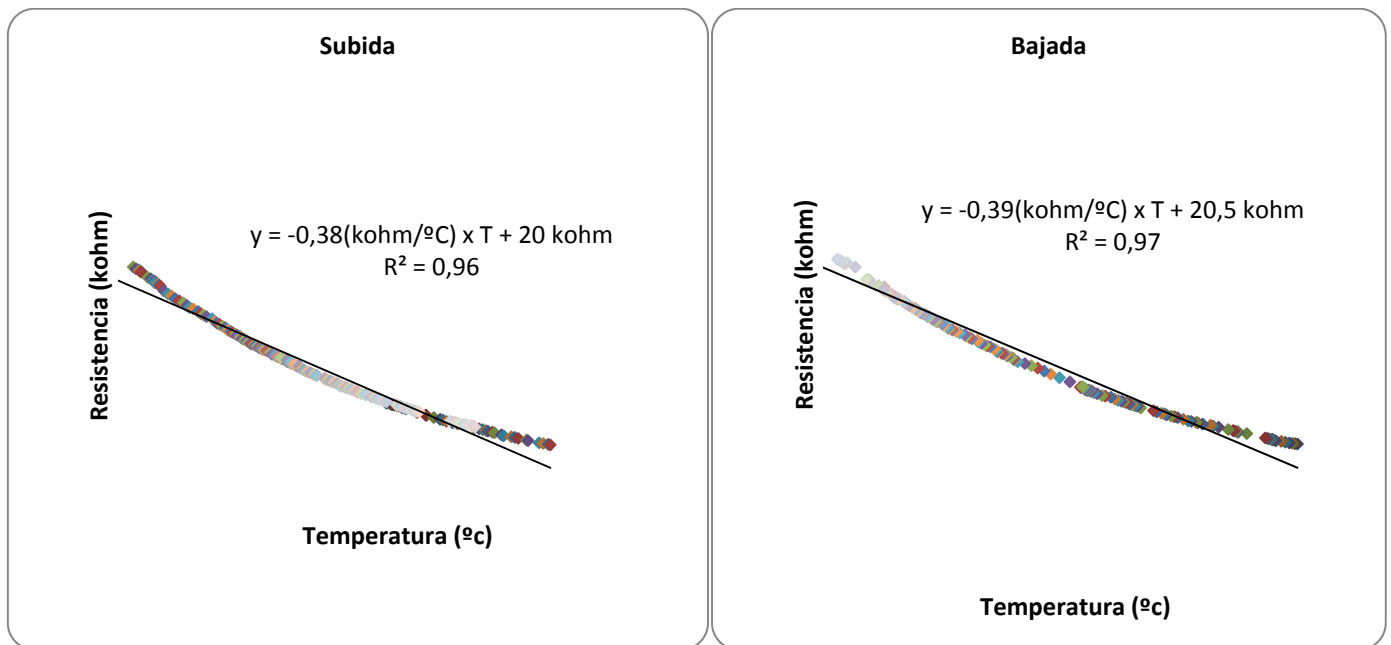
Figura 8: Esquema de un divisor de tensión

Aplicando una tensión constante en el extremo de la **NTC** variamos todo el rango de temperaturas en la caja climatizada y mediremos con un multímetro la tensión V_{out} que hay entre ambas resistencias. Lo compararemos con el voltaje que debería tener según nuestros modelos de $R(T)$.

Si representamos la resistencia **NTC** ($k\Omega$) vs Temperatura ($^{\circ}C$) comprobaremos que la resistencia tiene un coeficiente negativo con la temperatura (ver gráfica 1). Aquí queda descartado que la resistencia esté fabricada en metal, ya que la conductividad de los metales disminuye con T.

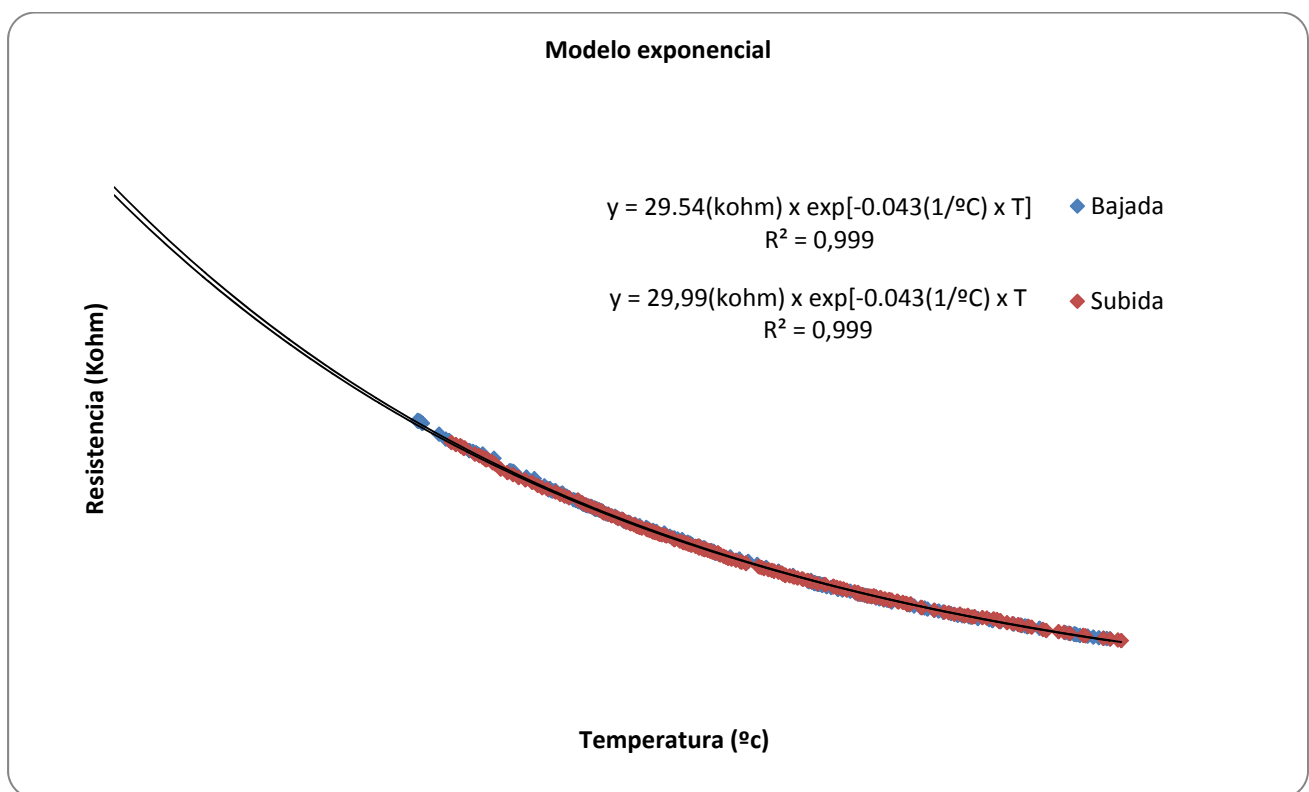
Vamos a hacer dos series de medidas: subiendo desde los $15^{\circ}C$ hasta $45^{\circ}C$ y bajando desde $45^{\circ}C$ a $15^{\circ}C$ por si acaso el material (o el procedimiento) tuviera algún tipo de histéresis.

Podemos hacer un modelo lineal de la resistencia con la temperatura:



Gráfica 1: Comportamiento de la resistencia NTC con la temperatura y regresión lineal.

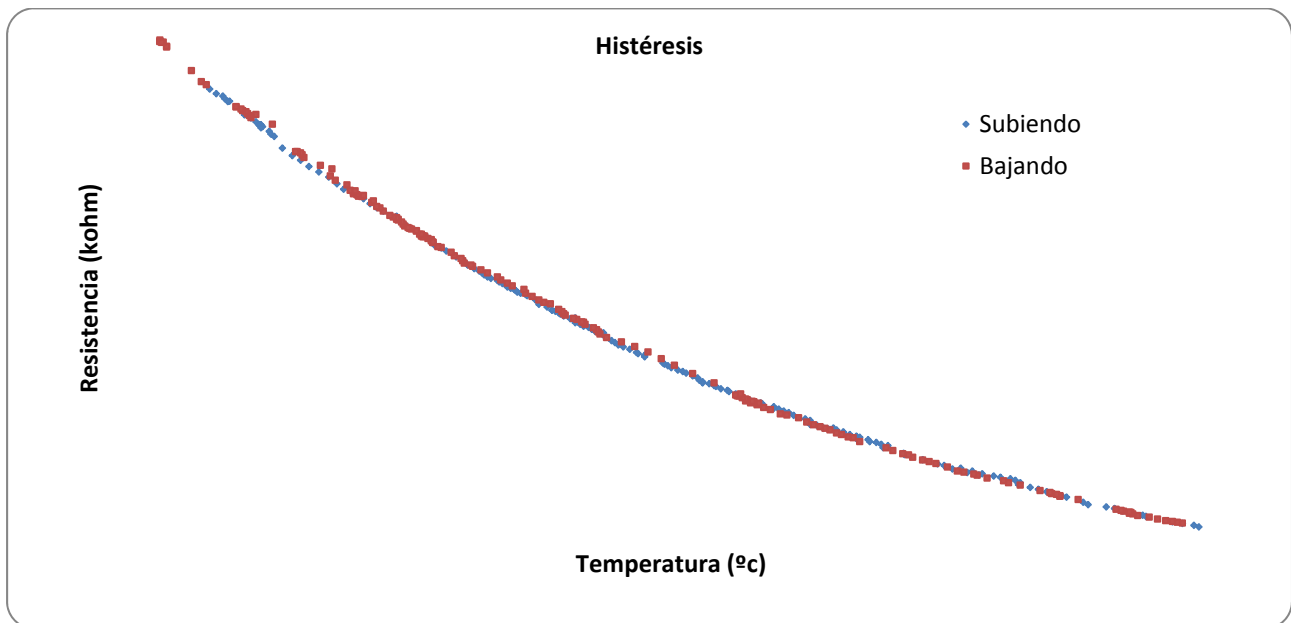
Es un modelo sencillo que puede facilitar mucho los cálculos posteriores, pero fuera del rango entre 25 y 35 °C se empieza a alejar de la realidad. Puede servir para pequeños intervalos de temperatura, pero para un rango de $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$ no parece muy preciso; ajusta mejor el modelo exponencial:



Gráfica 2: Modelo exponencial de R(T)

Una regresión exponencial de los mismos datos obtiene una curva que se ajusta mucho mejor

Podemos ver que el proceso tiene una histéresis mínima:



Gráfica 3: Histéresis de la resistencia NTC en un ciclo térmico 15 °C → 45 °C → 15 °C

$$\begin{aligned}
 \text{Histéresis} &= \int_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} (R_{\text{subida}} - R_{\text{bajada}}) dT = \int_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} (29.99 - 29.54) \text{k}\Omega \times \exp\left[-0.043 \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right) \times T\right] dT = \\
 &= 0.45 \text{k}\Omega \times \frac{[\exp(-0.043 \times 15) - \exp(-0.043 \times 45)]}{0.043 (^{\circ}\text{C})^{-1}} \approx 4 \text{k}\Omega \times ^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

en un área total de:

$$\begin{aligned}
 \int_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} R_{\text{subida}}(T) dT &= \int_{15^{\circ}\text{C}}^{45^{\circ}\text{C}} 29.99 (\text{k}\Omega) \times \exp\left[-0.043 \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right) \times T\right] dT = \\
 &= \frac{29.99 (\text{k}\Omega)}{0.043 \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right)} \times \left[\exp\left(-0.043 \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right) \times T\right)\right]_{45^{\circ}\text{C}}^{15^{\circ}\text{C}} = 265.3 (\text{k}\Omega \times ^{\circ}\text{C})
 \end{aligned}$$

\approx un 1.5% de histéresis

Para simplificar las cosas, haremos dos modelos de la resistencia variable, lineal y exponencial, que sean independientes del camino seguido. Vamos a suponer que el comportamiento real de la **NTC** sigue un camino intermedio entre la regresión de subida y la de bajada.

Para el modelo exponencial es bastante fácil, ya que buscamos una exponencial que esté a la misma distancia de R_{subida} que de R_{bajada} , o más bien, que la diferencia entre

$$R_{subida} \text{ y } R_{media} \text{ sea igual que } R_{media} \text{ y } R_{bajada}$$

Como ambas regresiones tienen el mismo coeficiente exponencial, aquella R_{media} no será más que la que tiene como constante la media de las constantes de subida y de bajada:

$$R_{media} = 29.75(k\Omega) \times \exp\left\{-0.043\left(\frac{1}{\text{°C}}\right) \times T\right\}$$

Para el modelo lineal el cálculo se complica un poco, pues es la búsqueda de la recta bisectriz (que es la curva equidistante a ambas rectas en todo momento).

Para definir esa bisectriz necesitamos un punto y una dirección, o lo que es lo mismo, el punto de corte entre ambas y una pendiente; esta pendiente será la tangente del ángulo medio. La Trigonometría nos dice que:

$$Tg\left(\frac{\theta + \Phi}{2}\right) = \frac{Tg\left(\frac{\theta}{2}\right) + Tg\left(\frac{\Phi}{2}\right)}{1 - Tg\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot Tg\left(\frac{\Phi}{2}\right)}$$

$$Tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{-1 + \sqrt{1 + [Tg(\alpha)]^2}}{Tg(\alpha)}$$

Siendo m_s y m_b las pendientes de subida y de bajada, $m_s = Tg(\theta)$ y $m_b = Tg(\Phi)$

$$\text{Las rectas son } \begin{cases} R_{subida} = 20(kohm) - 0.38\left(\frac{1}{\text{°C}}\right) \times T \\ R_{bajada} = 20.5(kohm) - 0.39\left(\frac{1}{\text{°C}}\right) \times T \end{cases}$$

$$\text{Cuyo punto de corte es } \begin{cases} T_{corte} = 44 \text{ °C} \\ R_{corte} = 3.3 kohm \end{cases}$$

$$\text{Y una pendiente } Tg\left(\frac{\theta + \Phi}{2}\right) = -0.38\left(\frac{kohm}{\text{°C}}\right)$$

$$\tilde{b} = R_{corte} - \tilde{m} \times T_{corte}$$

$$\text{La recta bisectriz queda } \begin{cases} \tilde{m} = -0.38\left(\frac{kohm}{\text{°C}}\right) \\ \tilde{b} = 20.3 kohm \end{cases} \rightarrow R_{media} = 20.3(k\Omega) - 0.38\left(\frac{k\Omega}{\text{°C}}\right) \times T$$

e) **El material con el que está fabricada la resistencia NTC es un semiconductor, podemos calcular su gap**

Como curiosidad, podemos tratar de averiguar de qué semiconductor se trata; sabemos que la resistencia depende de la resistividad multiplicada por un factor de forma (longitud/sección del cable), y la resistividad es la inversa de la conductividad. Así que, salvo por un factor multiplicativo, medir resistencias equivale a medir conductividades/resistividades:

$$R = \frac{l}{A} \rho = \frac{\text{factor de forma}}{\sigma} \rightarrow \sigma(T) = \frac{ff}{R(T)}$$

Si suponemos que el material es un semiconductor, su conductividad⁴ depende de la densidad de portadores y de su movilidad:

$$\sigma(T) = q(n\mu_e + p\mu_h)$$

Si el semiconductor no está dopado, o la temperatura es suficientemente alta para estar en el régimen intrínseco:

$$n = p = n_i \rightarrow qn_i(\mu_e + \mu_h)$$

$$\text{Y siendo } n_i = 2.5 \times 10^{19} \cdot \left(\frac{T}{300K}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{m_e^*}{m_e}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{m_p^*}{m_e}\right)^{3/4} \times \exp\left(\frac{-E_{gap}}{2k_B T}\right) \rightarrow$$

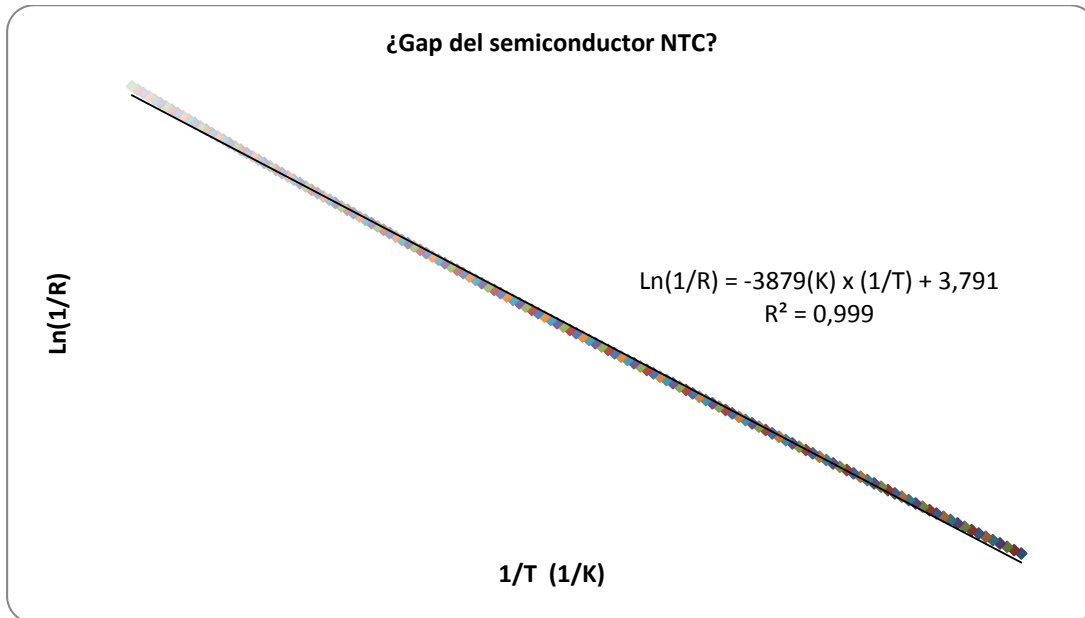
$$\rightarrow \frac{1}{R} = \frac{\sigma}{ff} = \frac{q}{ff} n_i(\mu_e + \mu_h) = \frac{q}{ff} (\mu_e + \mu_h) \cdot 2.5 \times 10^{19} \cdot \left(\frac{T}{300K}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{m_e^*}{m_e}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{m_p^*}{m_e}\right)^{3/4} \times \exp\left(\frac{-E_{gap}}{2k_B T}\right)$$

Como las movilidades y las masas efectivas tienen una dependencia con la temperatura $\propto T^{3/2} \cdot \frac{m^*}{m_e}$, el término exponencial es dominante en esta función; por tanto, si representamos $\ln(1/R)$ vs $(1/T)$ vamos a obtener algo así:

$$\ln\left(\frac{1}{R}\right) = \ln\left(\frac{\sigma}{ff}\right) \approx \ln(cte) - \frac{E_{gap}}{2k_B} \times \frac{1}{T} \rightarrow y = b - m \cdot x$$

⁴ *Semiconductor Physics and devices*, Donald A. Neaman, Ed Irwin

Cuya pendiente está directamente relacionada con el gap (Banda de energía prohibida entre la Banda de Conducción y la Banda de Valencia) que tiene la red cristalina.



Gráfica 4: Logaritmo neperiano de la Resistencia vs inversa de la temperatura

Con esta regresión (ver gráfica 4) podemos estimar el gap del semiconductor:

$$E_g = -2k_B \times m = -2 \times 8.6173324 \times 10^{-5} \left(\frac{eV}{K} \right) \times (-3879 K) = 0.668 eV$$

Es un valor muy parecido a los 0.67 eV del Germanio, aunque también hay otros candidatos⁵, como el Antimoniuro de galio (GaSb, 0.7 eV) o el Nitruro de Indio (InN, 0.7 eV); aunque es poco probable que se fabriquen resistencias comerciales con semiconductores tan exóticos.

⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Banda_prohibida

Vout Vs Temperatura

Para confirmar la fiabilidad de nuestros modelos lineal y exponencial, vamos a construir un divisor de tensión con la **NTC** y una resistencia constante de 472,8 kΩ;

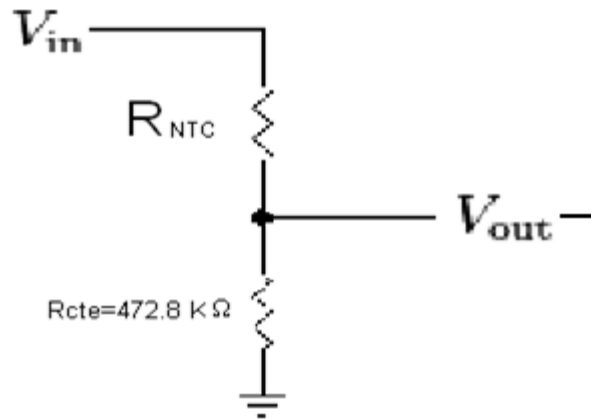


Figura 9: Esquema de nuestro divisor de tensión

Aplicaremos una V_{in} de 30 V y 70 V e iremos barriendo la temperatura dentro del rango 15 a 45 °C

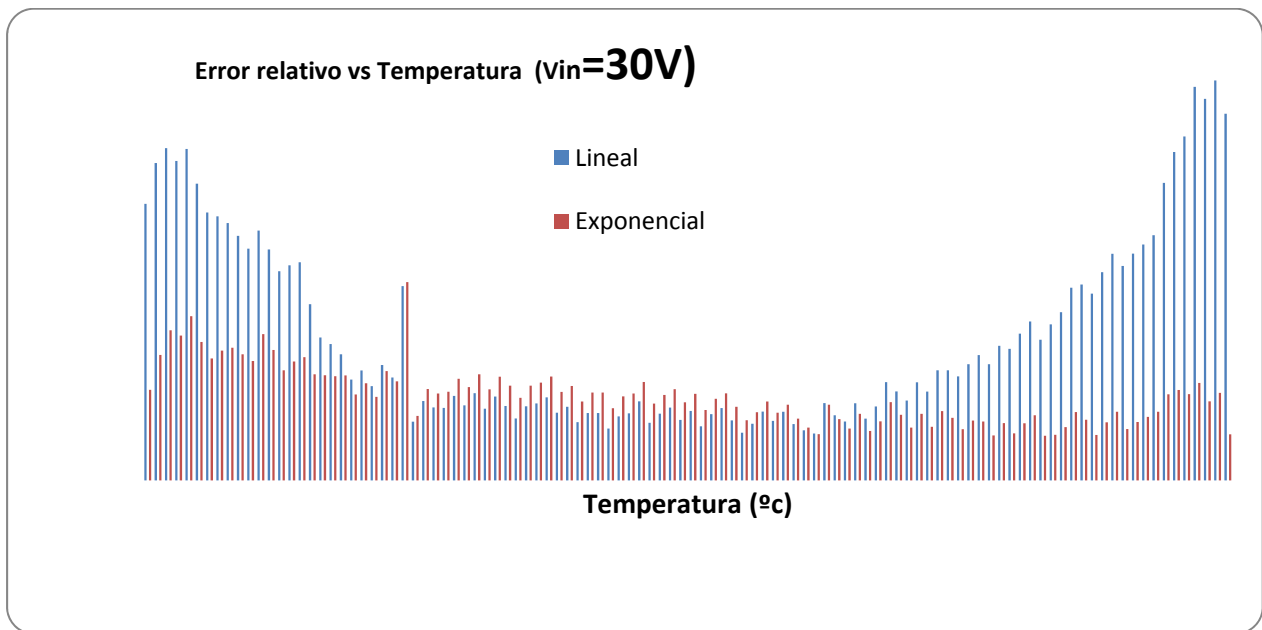
Mediremos V_{out} con un multímetro y lo compararemos con el V_{out} resultante de nuestras dos simulaciones de **NTC**

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_{cte}}{R_{cte} + R(T)} = \begin{cases} \text{lineal: } V_{in} \times \frac{R_{cte}}{R_{cte} + b - m \times T} \\ \text{exponencial: } V_{in} \times \frac{R_{cte}}{R_{cte} + K \cdot \exp(-c \cdot T)} \end{cases}$$

El error de nuestras simulaciones será

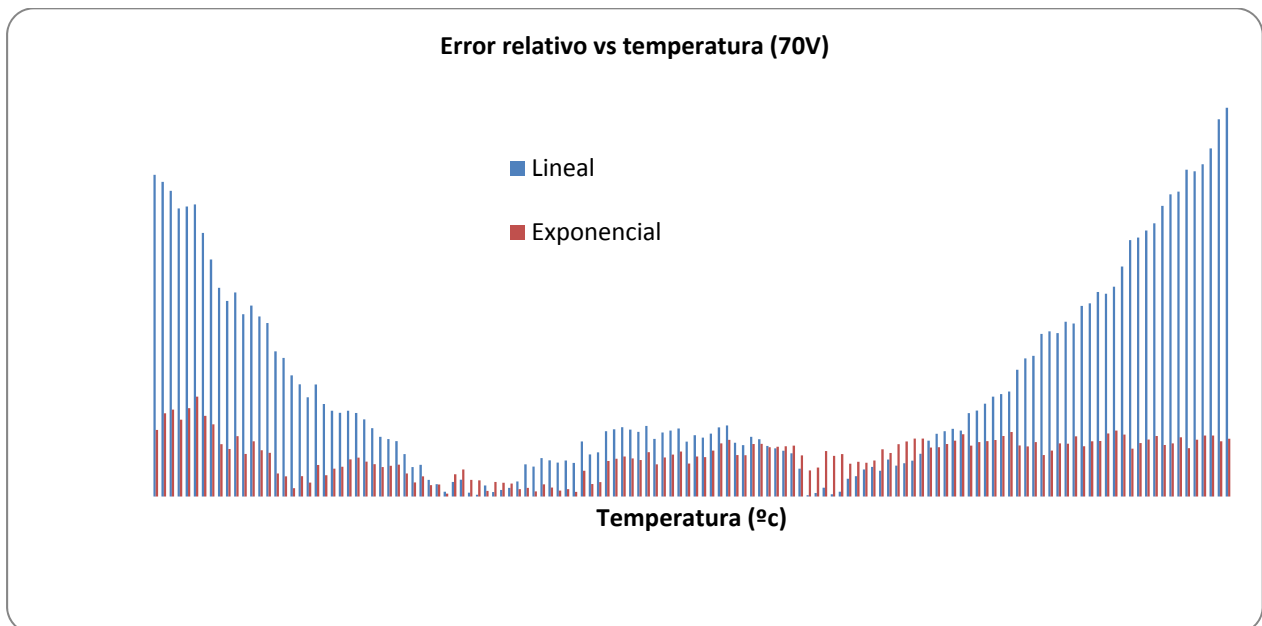
$$\frac{V_{simulado} - V_{medido}}{V_{medido}} \times 100 \text{ (en \%)}$$

Para 30V:



Gráfica 5: Error relativo (en %) vs Temperatura de los dos modelos de Termo-resistencia para una $V_{in}=30V$

Para 70V:



Gráfica 6: Error relativo (en %) vs Temperatura de los dos modelos de Termo-resistencia para una $V_{in}=70V$

Se puede apreciar que, mientras el modelo lineal funciona bien entre los 21 y 36 grados, el modelo exponencial presenta un error relativo más bajo y casi-constante en todo el rango de temperaturas.

Posición del pico de Cesio-137

a) Caracterización del SiPM

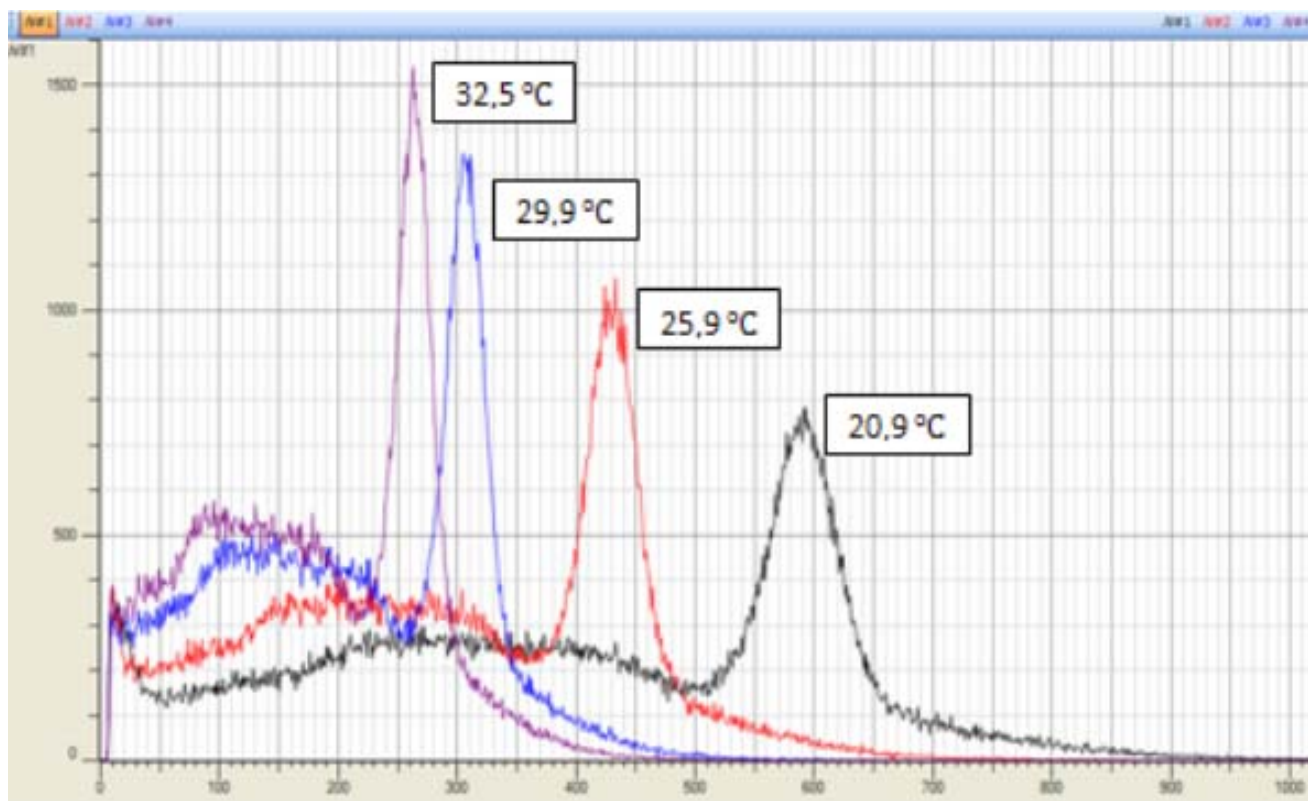
Tenemos un detector **SiPM** modelo **S10362-11-050U/C** (*Hamamatsu*) acoplado mediante grasa óptica a un cristal centellador **LYSO**; colocamos una cobertura de plástico mate. Sobre el plástico descansa una fuente de Cs-137 con una actividad a fecha de fabricación (Agosto 2000) de **5 μ Ci** (ver figura 9).



Figura 3: Set-up de la caracterización del SiPM. Zona inferior, la zona turbulenta con el foco caliente (resistencia cementada + ventilador), separada de la Zona Homogénea por el filtro: Sondas AKO y TA20, muestra de Cesio-137 sobre un cristal LYSO que descansa sobre el detector S10362-11-050U/C; el conjunto centelleador + SiPM cubierto por un material opaco pues la luz visible genera pares de portadores en el detector.

Hamamatsu funciona como un diodo, lo alimentaremos en inversa a 69.7 V; está montado en una placa con preamplificadores que hay que alimentar con DC (+5V y -5V).

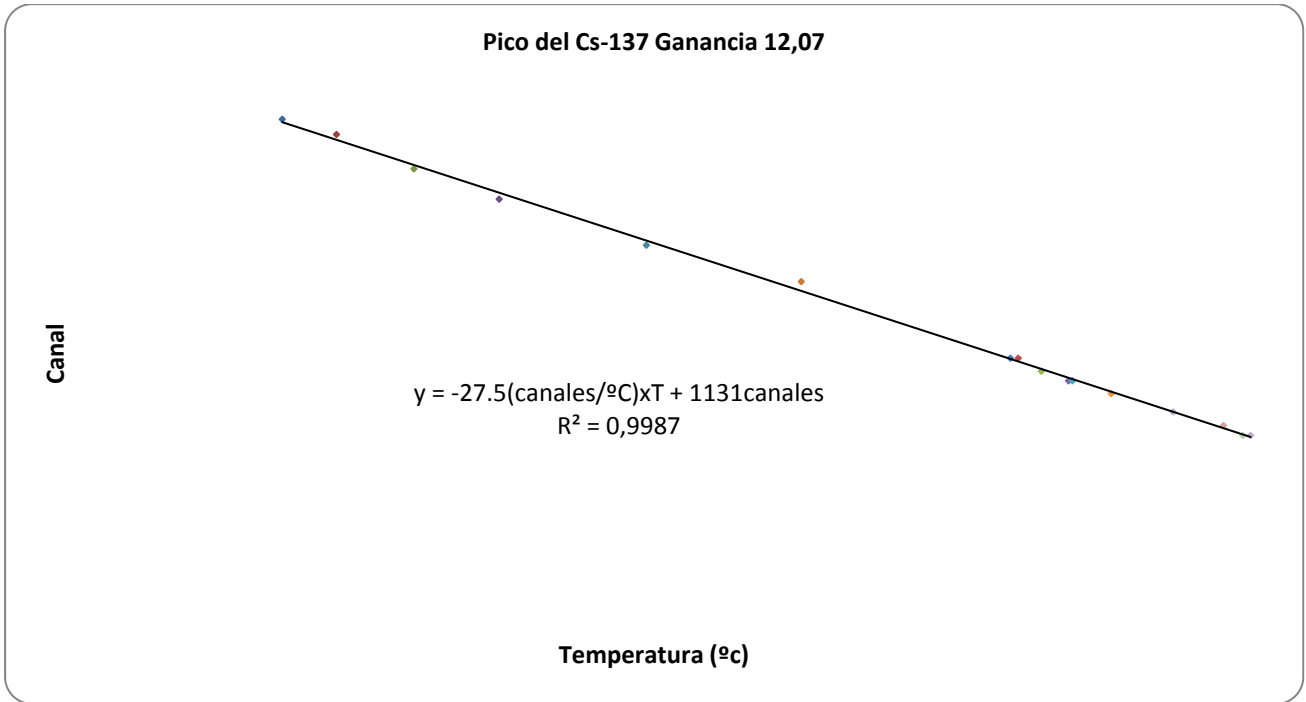
La señal llega a un amplificador *VKA-BOX* conectado a un *Pocket-CASSY* con el que podremos analizar el espectro con el programa *CASSY-Lab*; observaremos cómo se desplaza el pico del cesio (662 keV) según varía la temperatura (ver gráficas 7 y 8) manteniendo constante la ganancia digital.



Gráfica 7: Espectros del cesio a distintas temperaturas

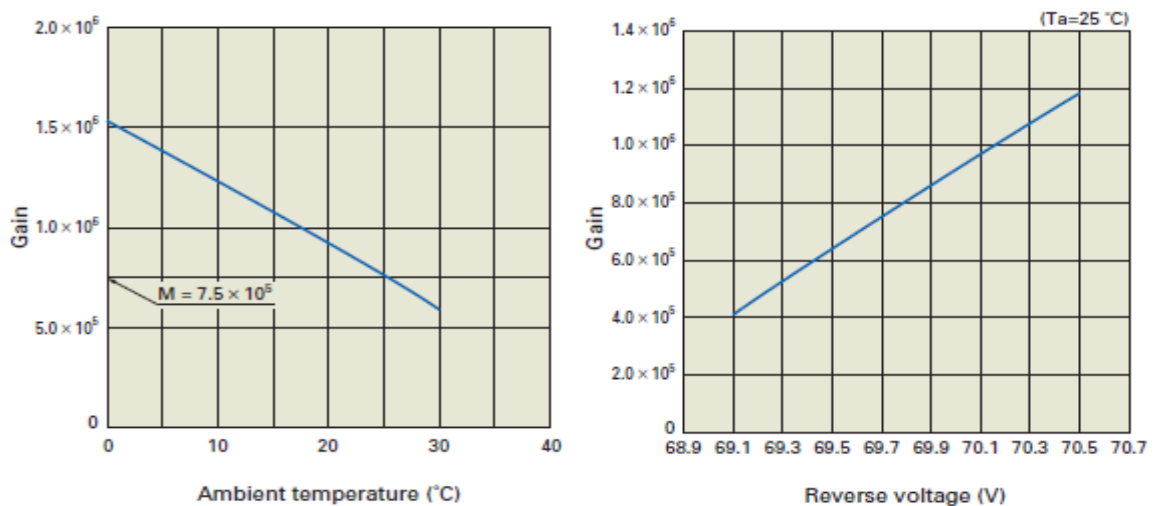
Ahora pasaremos a representar la posición del centroide del Cs-137 (en canales) en función de la temperatura a la que se encuentra el **SiPM**. Se puede apreciar (ver gráfica 8) que ajusta muy bien a una regresión lineal Canales Vs Temperatura.

Ese comportamiento lineal Temperatura – Canales nos facilita mucho la caracterización térmica del **S10362-11-050U/C**.



Gráfica 8: Posición del centroide de 662 KeV con la temperatura

Se aprecia un gran desplazamiento del pico según la temperatura del detector; esto es debido a que al ser un detector basado en diodos semiconductores, tiene una fuerte dependencia de su ganancia con la temperatura. Como se puede ver en la siguiente gráfica, manteniendo constante el voltaje inverso, se puede perder la mitad de ganancia en unos 25°C

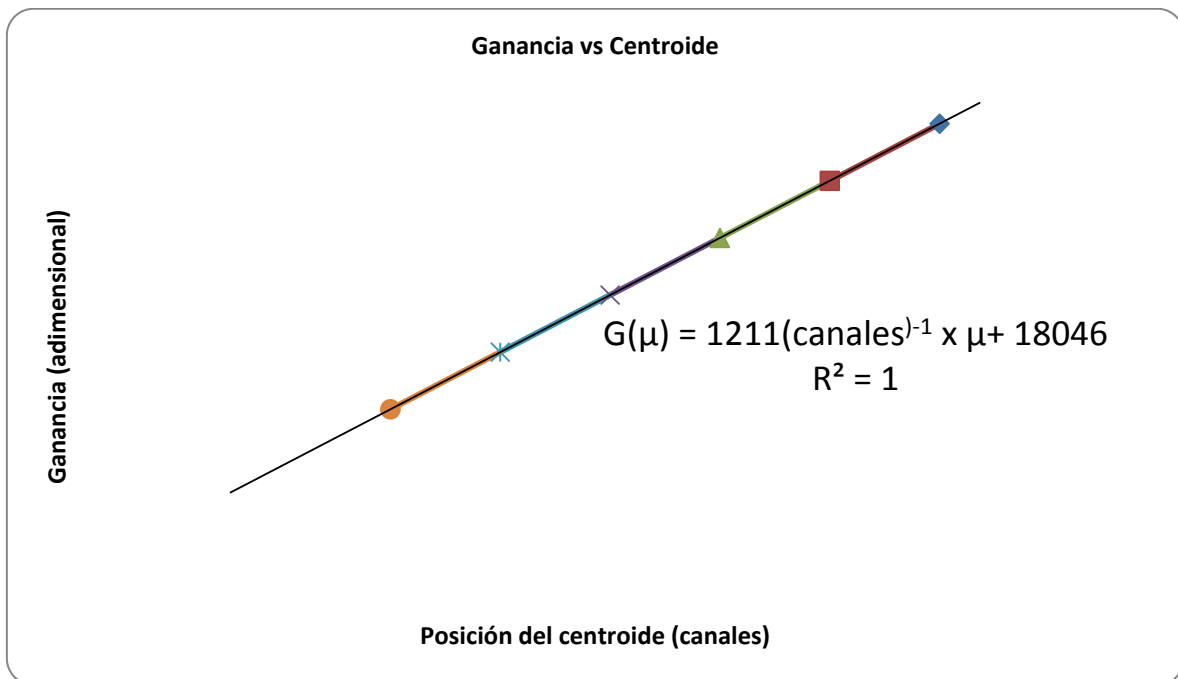


Gráfica 9: Ganancia vs Temperatura y Ganancia vs Voltaje para nuestro detector⁶

⁶ Hamamatsu's Technical Specifications for Multi-Pixel-Photon-Counter™

Como se aprecia una relación lineal Ganancia-Temperatura análoga a la de Posición pico – Temperatura, podemos asociar la Ganancia con la posición en canales del fotopico.

$$\text{para un } V_{bias} = 69.7 \text{ V} \left\{ \begin{array}{l} \text{Según Hamamatsu: } G(T) = 1.55 \times 10^6 - 3.33 \times 10^4 \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) \times T \\ \text{Regresión centroide – temperatura: } \mu = 1131 - 27.5 \left(\frac{\text{canales}}{^{\circ}\text{C}} \right) \times T \end{array} \right.$$



Gráfica 9: Relación Ganancia – Posición del pico 662KeV

Esa ordenada en el origen puede significar la ganancia mínima que necesita el **SiPM** para empezar a detectar la gamma del Cs-137 y corresponde a la ganancia a 41°C

Nuestra interpretación de ganancia nula es aquella en la que el pico se ha ido desplazando hacia canales bajos; la temperatura en la que el pico llega al “canal 0” es (ver gráfica 8):

$$T_{\text{límite}} = \frac{1131 \text{ canales}}{27.5 \left(\frac{\text{canales}}{^{\circ}\text{C}} \right)} \approx 41^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Caracterización SiPM}(V_{\text{bias}} = 69.7 \text{ V}) \left\{ \begin{array}{l} \Delta G(T) = 3.33 \times 10^4 (^{\circ}\text{C})^{-1} \\ \Delta \mu(T) = -27.5 \left(\frac{\text{canales}}{^{\circ}\text{C}} \right) \\ \Delta G(\mu) = 1211 (\text{canales})^{-1} \end{array} \right.$$

Posición del centroide a 25 °C : canal 453

Tomando como referencia la ganancia del **S10362-11-050U/C** a temperatura ambiente (25 °C), las oscilaciones de la temperatura dan lugar a unas variaciones apreciables de ganancia relativa:

$$\Delta T = \pm 1^{\circ}\text{C} \rightarrow \frac{\Delta G}{G(25^{\circ}\text{C})} = 4.44\%$$

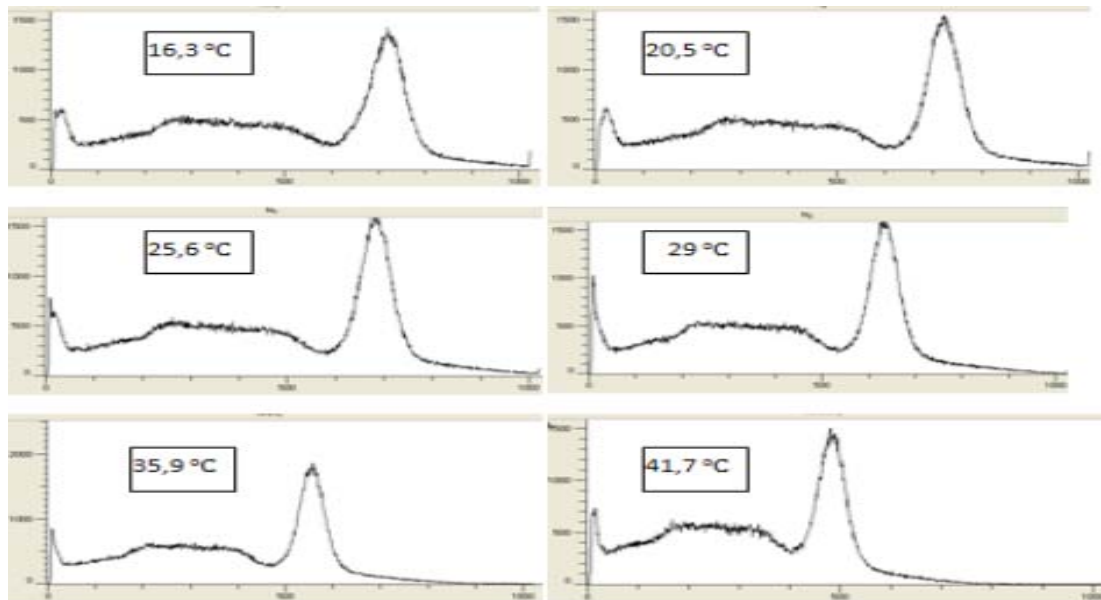
Pero si tenemos en cuenta el desplazamiento en canales tomando como referencia el canal a 25°C

$$\Delta T = \pm 1^{\circ}\text{C} \rightarrow \frac{\Delta \mu}{\mu(25^{\circ}\text{C})} = 6.07\%$$

b) Detector con compensación

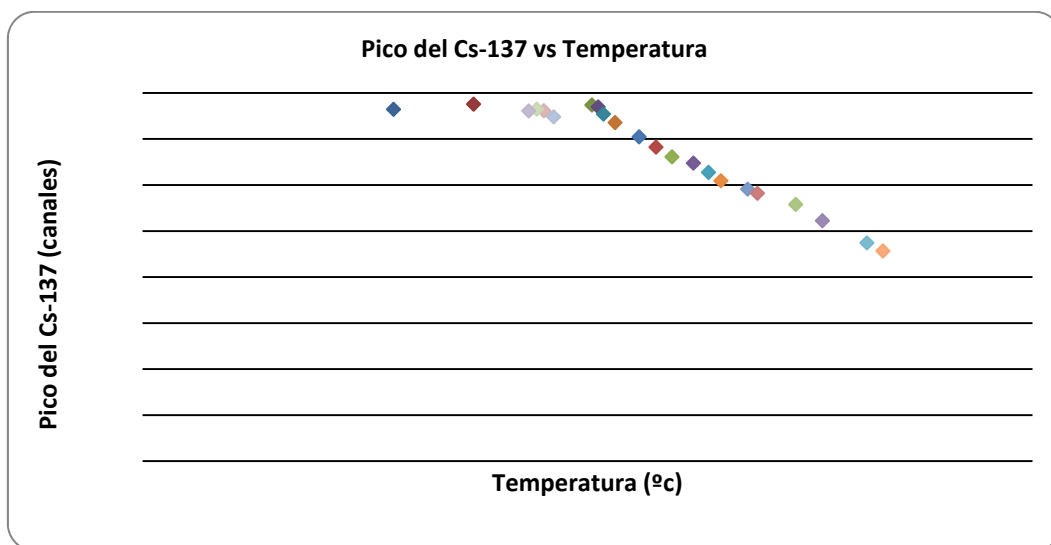
El Grupo de Nuclear UCM está desarrollando un compensador para reducir el cambio de ganancia con la temperatura; ya que nuestro montaje puede ser útil para este tipo de experimentos, aprovechamos para comprobar el correcto funcionamiento del artilugio.

Volvemos a comparar espectros vs temperatura con ese compensador (ver gráficas 11 y 12) para determinar el rango de temperaturas en el que mantiene constante la ganancia del **SIPM**.



Gráfica 11: Evolución del pico de Cs-137 con la temperatura

El dispositivo funciona hasta unos 25-26 °C, a partir de ahí los canales caen pero más suavemente que sin compensación: Unos 20 canales/°C, que es una caída en canales del 2.6% con respecto a la posición estable



Gráfica 12: Efecto del compensador sobre el espectro del Cs-137, posición del centroide vs temperatura

Discusión de los resultados y Conclusiones

- a) Medida de la termorresistencia y puente de diodos: La cámara térmica tiene buenas prestaciones, la temperatura en la Zona Homogénea es estable y muy homogénea. Prueba de ello es la buena caracterización de la termorresistencia, pues al aplicar el modelo exponencial de $R(T)$ al puente de diodos tenemos un error relativo menor al 0.2% para $V_m = 30V$ y menor a 0.1% para $V_m = 70V$
- b) La medida del Gap del presunto semiconductor del que está formado la termorresistencia no era un objetivo de este proyecto, pero la forma exponencial de la resistencia nos recordó el modelo típico de densidad de portadores⁷; hemos incluido esa discusión como ejemplo de experimento que se podría dar en el interior de nuestra cámara climática. No puede tomarse como demostración de la naturaleza del material ya que los resultados no son concluyentes.
- c) Caracterización térmica del **S10362-11-050U/C**: Como *Hamamatsu* sólo aporta la curva $G(T)$ para unas condiciones determinadas no podemos dar una relación absoluta Ganancia – Temperatura hasta que no encontremos una referencia absoluta de esa ganancia. Tomaremos como referencia absoluta la posición del pico 662 KeV dado que el **ADC** asigna un valor canal integrando el pulso eléctrico que detecta; así que si, a pesar de estar fuera de la curva $G(T)$ para $V_{bias} = 69.7v$, el pico del Cs-137 se mantiene en su posición significa que el detector **SiPM** mantiene la ganancia. Por eso era importante hallar la relación Ganancia – Posición del fotopico.
- d) Compensación: El compensador ha tenido unos efectos prometedores, ha duplicado la eficiencia de detección a 25.9°C, ha mantenido el centroide del cesio en un rango de unos 10°C y cuando el pico empieza a desplazarse, lo hace con una tasa un 30% menor que con el **SiPM** en solitario. Quizás habrá que pensar la manera de compensar la pérdida de ganancia del detector modificando la ganancia digital.

Construir una cámara aislada para experimentos de temperatura tiene varias complicaciones desde mi punto de vista:

- La primera de todas es la imposibilidad física de aislar ninguna región del espacio totalmente; por tanto, para mantener constante cierta temperatura, hará falta un flujo de energía positivo o negativo según nos encontremos por encima o por debajo de la temperatura ambiente. Como nuestra caja es muy pequeña, su temperatura depende mucho de la temperatura a la que se encuentra el laboratorio.

⁷ *Introducción a la Electrónica de los Semiconductores*, R.P.Nanavati, Ed.Labor (pag 58)

- La segunda deriva de no tener una cámara sellada; como hay un flujo de materia que entra, obligatoriamente provoca un flujo de salida, lo que puede generar un estado estacionario pero inhomogéneo de las temperaturas. Es lo que hemos solucionado en gran medida con el filtro, reduciendo mucho la cantidad de aire que entra en la zona homogénea podemos llegar a un régimen no turbulento.

El gran hándicap de nuestro montaje está en los tiempos de medida, los saltos entre “Zonas Térmicas” y las vibraciones provocadas en su interior:

- a) Mientras la cámara se mueva en la misma zona térmica, sólo hay que esperar unos ~~10~15 minutos~~ entre medida y medida; pero al modificar la disposición flaps-tronera para saltar a otra región de las temperaturas, la zona homogénea necesita tiempos mayores a una hora para llegar al equilibrio.
- b) No se puede dejar el montaje en “stand by” pues es muy costoso dejar encendido el aire acondicionado toda la noche; más problemático sería dejar encendida la resistencia disipadora, ya que se puede despegar del ventilador y derretir el poliespan.
- c) El aire acondicionado, cuando impacta de lleno en la tronera, provoca fuertes vibraciones en el interior de la cámara; nuestro dispositivo no está diseñado para desarrollar experimentos en los que se necesite introducir dispositivos mecánicamente sensibles.

Lo que resulta en experimentos demasiado lentos, de unas quince medidas al día; si para caracterizar bien cualquier dispositivo se necesitan cincuenta puntos, el proceso puede durar una semana.

Los detectores tipo **SiPM** son muy sensibles frente a oscilaciones térmicas, por lo que se deberá trabajar mucho en idear una forma de compensar esas oscilaciones si se quieren emplear como instrumentos de precisión. Si se quieren implementar en escáneres de hospital se tendrá que cuidar mucho de no superar los 35°C ya que a partir de ahí la ganancia disminuye mucho.

El compensador funciona bien hasta los 26°C, por encima de esta temperatura es necesario cambiar la ganancia digital con la temperatura del **Pocket-CASSY**. Pero de todas formas es posible que las máquinas **PET + NMR** tengan un buen sistema de refrigeración y no superen los 25°C

Disposiciones legales

El abajo firmante, matriculado en el Máster Interuniversitario 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 térmica de un detector MPPC (SiPM)”, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo la dirección de J.Manuel Udías en el Departamento de Física Atómica, Molecular y 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:

__ Un año

Fdo:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Villarreal', with a stylized flourish extending to the right.

El abajo firmante, director de un Trabajo Fin de Master presentado en el Máster Interuniversitario 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 térmica de un detector MPPC (SiPM)”, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo mi dirección en el Departamento de Física Atómica, Molecular y 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:

__ Un año

Fdo: