
TRABAJO FIN DE GRADO FISICA 2013/2014

Construcción de una Cámara de Niebla

Autor: **Luis Miguel García Martín**

Dpto. de Física Teórica y del Cosmos

Universidad de Granada

Junio 2014



ugr

Universidad
de **Granada**

1. Summary (English)

The objective of this *Trabajo Fin de Grado* (TFG) was to build a diffusion cloud chamber using household means and materials, and to understand its operation and the physical processes that take place in it from the display and identification of particle traces from ambient radiation.

A summary of this work can be downloaded from the following link:

<http://camara-de-niebla.blogspot.com.es/2014/06/contruccion-de-una-camara-de-niebla-de.html>

It is important to emphasize that this TFG was not limited to the construction of a device that allows only the visualization of particle tracks. The detector was equipped with sensors that monitor the temperature, with an **Arduino** module for signal reading, a LCD to show on-line measures, an alarm system based on LEDs and a computer interface for a continuous temperature monitoring. Each of these control and analysis programs were developed in the context of this work. That makes the detector resulting of this TFG into a tool that can be used as educational material useful for teachers to illustrate the different parts of a particle detector, from the mechanical design to the data recording and processing.

This TFG followed the usual experimental method: bibliographic documentation; prototype construction; design, construction and testing of final detector; system calibration; drafting procedures manual; limitations and improvements; conclusions.

Work began, then, with a bibliographic review of the history, operation and methods of cloud chambers. Simultaneously, delved into phenomenological aspects of radiation through matter, verifying the theoretical concepts elaborating computer programs that calculate energy loss per unit distance, ranges, etc. for different types and momentums of particles.

Then, a proof-of-principle phase started, blinding and testing several cloud chamber prototypes in order to enclose the main problems and limitation that this type of devices have. After that we proceeded with the assembling of the final version of the chamber in which the proposed improvements were incorporated. The final version of the chamber was successfully tested through the observation of the corresponding traces of several interaction processes of elementary particles, proving the efficiency of the proposed improvements.

I would qualify as a success the realization of this TFG since it has given to me extra academic training to the one received during the Grade in the following fields:

- *Experimental Physics*: through the design, construction and testing of a homemade detector of elementary particles.
- *Electronics*: through the use and programming of **Arduino** modules to controlling the temperature in the chamber as well as the experimental assembly of electrical components (cables, resistors, thermistors, LEDs, etc.) installed in the chamber.
- *Programming*: through the writing in C++ code the programs which were used for the analysis of the interaction of particles in matter.
- *Scientific of data analysis package ROOT*: used to analyze the temperature calibration data of the chamber.
- *Scientific typesetting package L^AT_EX*: this document is written using this package, so widespread among scientists.

The document is organized as follows. Section 3 provides a brief historical and conceptual introduction to cloud chambers. The basics of its operation as well as a brief overview of the physical processes that take place when particles pass through matter is described in section 4. The details of the experimental setup of the cloud chamber are reported in section 5, while section 6 is devoted to the description of the experimental procedure of the cloud chamber operation and functioning. The results obtained during the operation of the chamber in real condition are summarized in section 7. The work is completed with five appendices where we provide additional material developed in this work: a description of the prototypes realized prior to the final design (appendix A), details of the improvements introduced by the alcohol injection (appendix B), monitor temperature system inside the chamber (appendix C), and control codes of **Arduino** and data analysis (appendix D and E).

2. Resumen (Español)

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado (TFG) fue el de construir una cámara de niebla *de difusión* a partir de medios y materiales *caseros*, y comprender su funcionamiento y el de los procesos físicos que en ella tienen lugar a partir de la visualización e identificación de trazas de partículas provenientes de radiación ambiental.

En el siguiente enlace puede visualizarse un vídeo corto que resume este trabajo:

<http://camara-de-niebla.blogspot.com.es/2014/06/contruccion-de-una-camara-de-niebla-de.html>

Es importante destacar que este TFG no se limitó a la construcción de un dispositivo que permite “únicamente” visualizar partículas, sino que lo equipó con sensores de monitoraje de la temperatura, con un módulo **Arduino** para la lectura de señales, un display LCD para mostrar de manera instantánea las medidas, un sistema de alerta basado en LEDs y un interfaz con ordenador para seguimiento continuo de la temperatura. Todos los programas de control y análisis fueron elaborados en el contexto de este trabajo. Ello confiere a la cámara resultante del TFG en *una herramienta que puede ser utilizada como material pedagógico útil por parte del profesorado para ilustrar, de manera didáctica, las diferentes partes de un detector de partículas, desde la visualización hasta el registro y procesado de datos*.

El TFG se realizó aplicando el método experimental usual, siguiendo los siguientes pasos: documentación bibliográfica; construcción de prototipo; diseño, construcción y testeo de detector final; calibrado del aparato; redacción de manual de procedimiento; limitaciones y mejoras; conclusiones.

El trabajo comenzó, pues, con una investigación bibliográfica de la historia, el funcionamiento y métodos de construcción de cámaras de niebla. Simultáneamente se profundizó en aspectos fenomenológicos relacionados con el paso de radiación en materia, verificando los conceptos teóricos con programas informáticos elaborados que calculan pérdidas de energía por unidad de distancia, rangos, etc. para diferentes tipos de partículas y momentos de las mismas.

Se realizó entonces una *prueba de principios* de cámara de niebla, construyendo y testando varios prototipos con el objeto de acotar los principales problemas y limitaciones que tienen este tipo de dispositivos. Se procedió entonces al montaje de la versión final de la cámara, a la que fueron incorporadas las mejoras propuestas. Finalmente, se probó de manera exitosa la cámara observando trazas correspondientes a distintos procesos de interacción de partículas elementales, demostrando la eficiencia de las mejoras propuestas.

Calificaría de enormemente positiva la realización de este TFG ya que me ha aportado formación académica adicional a la recibida durante el Grado en los siguientes campos:

- *Física experimental*: mediante el diseño, construcción y testeo de un detector casero de partículas elementales.
- *Electrónica*: a través del uso y programación de módulos **Arduino** para el control de la temperatura en la cámara, además del montaje experimental de los distintos componentes eléctricos (cables, resistencias, termistores, LEDs, etc.) instalados en la cámara.
- *Programación*: mediante la escritura en código C de los programas que sirvieron para el estudio de la interacción de las partículas en materia.
- *Paquete científico de análisis de datos ROOT*: empleado para el análisis de los datos obtenidos con el calibrado de la temperatura de la cámara.
- *Paquete científico de composición de textos L^AT_EX*: el trabajo me ha permitido iniciarme y manejarme ahora con confianza en el empleo de este paquete, de uso tan extendido entre los científicos.

El documento se organiza de la siguiente manera. La sección 3 ofrece una breve introducción histórica y conceptual sobre las cámaras de niebla. Los fundamentos de su funcionamiento así como un breve repaso de los procesos que tienen lugar cuando las partículas atraviesan la materia se describen en la sección 4. Los detalles del montaje experimental de la versión final de la cámara de niebla construida se reportan en la sección 5, mientras que la sección 6 se dedica a describir el procedimiento experimental a seguir para su correcta operación y funcionamiento. Los resultados obtenidos durante la operación de la cámara en condiciones reales se resumen en la sección 7. El trabajo se completa con cinco apéndices donde se ofrece material adicional elaborado en este trabajo fin de grado: una descripción de los prototipos realizados previos al diseño final (apéndice A), detalles sobre la mejora introducida por el sistema de inyección de alcohol (apéndice B), sistema de monitoraje de la temperatura en el interior de la cámara (apéndice C), y códigos de control de **Arduino** y análisis de datos (apéndices D y E).

Índice

1. Summary (English)	1
2. Resumen (Español)	2
Índice	3
3. Introducción	4
4. Fundamentos teóricos	5
4.1. Funcionamiento de una cámara de niebla de difusión	5
4.2. Bethe–Bloch	6
4.3. Radiación ambiental	7
5. Montaje experimental final de la cámara de niebla	10
5.1. Estructura básica	10
5.2. Dispensador de alcohol	11
5.3. Muestra radiactiva	12
5.4. Medidor de temperatura	13
5.4.1. Termistores	13
5.4.2. Arduino	15
5.4.3. Terminal avanzado y ROOT	17
5.4.4. Calibrado	18
6. Procedimiento experimental	21
7. Resultados	23
8. Conclusiones	27
Referencias	28
Apéndices	29
A. PROTOTIPOS	30
A.1. Materiales, Montaje y Resultados	30
A.2. Placa Petri	31
A.3. Tarro de cristal	31
A.4. Vaso de cuba-litro	31
A.5. Pecera	31
A.6. Conclusiones	32
B. MEJORA DE ALCOHOL PERMANENTE	34
B.1. Material	34
B.2. Primera prueba	34
B.3. Segunda prueba	35
B.4. Prueba final	36
B.5. Conclusiones	37
C. CONTROL DE TEMPERATURA	39
C.1. Medida del gradiente de temperatura	39
C.2. Montaje y Calibrado	39
C.3. Conclusiones	44
D. CODIGO DE INTERFACE MODULO Arduino	45
E. CODIGO ROOT DE ANALISIS DE TERMISTORES	49

3. Introducción

Tras el descubrimiento de la radiactividad a principios del siglo XX y la creación de detectores que permitían medir la energía de las partículas radiadas surgió la necesidad de detectar también sus trayectorias y estudiar su comportamiento. El primer dispositivo con este fin fue inventado por Charles Thomas Wilson (1869-1959) y consistía en un medio activo en el que las partículas dejaban una traza visible. Wilson era un físico escocés que estudiaba la formación de vapor de agua y los fenómenos ópticos que se producen en la naturaleza cuando hay bruma o niebla. Para ello comenzó a diseñar cámaras de expansión adiabática con aire saturado de vapor de agua para recrear la niebla artificialmente en su laboratorio. Wilson se percató de que los iones que había en el interior de esta atmósfera podían actuar como núcleos de condensación, esta observación le condujo a crear la primera cámara de niebla en 1911 llamada cámara de niebla de Wilson o de expansión.

En la cámara original el aire del interior estaba saturado con vapor de agua y un diafragma realizaba expansiones adiabáticas, con esto se conseguía enfriar el aire y crear una situación apropiada para la condensación. Cuando partículas cargadas atravesaban el medio formaban trazas de niebla a su paso debido a que ionizaban los átomos del medio y estos actuaban como núcleos de condensación. En la figura 1 (izquierda) puede verse una fotografía de esta cámara.

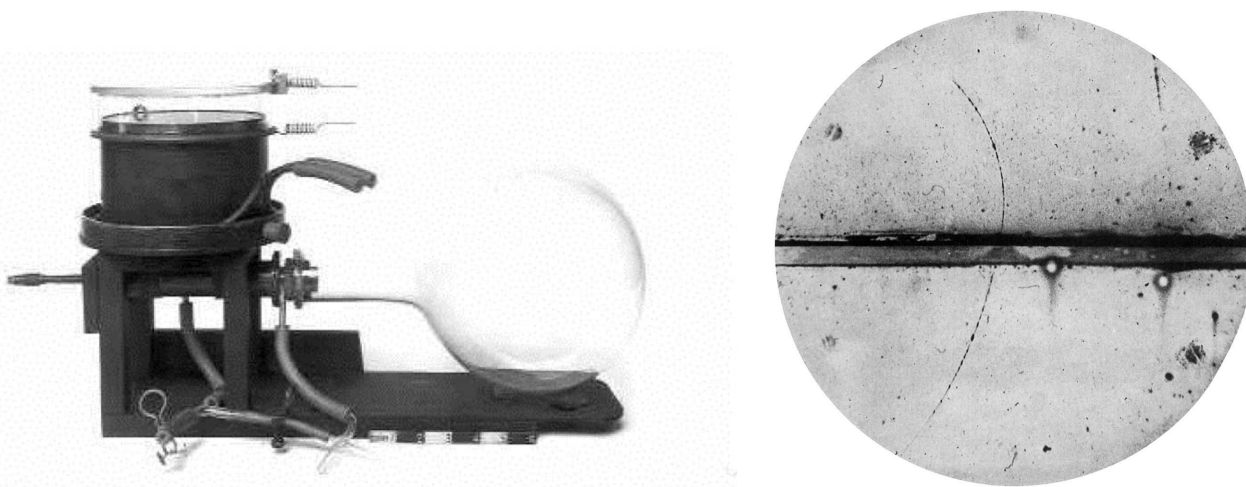


Figura 1: Izquierda: Cámara de niebla de Wilson. Derecha: Descubrimiento del positrón con una cámara de niebla de Wilson.

El problema de este tipo de cámara es que las condiciones necesarias para que se produzcan trazas no se mantienen, sino que sólo se consiguen cuando se produce la expansión, por lo que cada vez que se quería ver trazas debían realizarse sucesivas expansiones adiabáticas. Posteriormente, Patrick Blackett perfeccionó el sistema aumentando la frecuencia de expansiones ya que en el primer diseño había que esperar alrededor de un minuto para que el vapor de agua pudiera condensarse suficiente tras una expansión adiabática.

Como las trazas las forman partículas cargadas en movimiento es posible curvarlas usando campos magnéticos pero deben ser lo suficientemente intensos como para que la curvatura sea apreciable. Midiendo la curvatura y conociendo el valor del campo es posible calcular la masa de las partículas.

Wilson recibió el premio Nobel en Física por su trabajo en torno a la cámara de niebla en 1927. Posteriormente, Carl Anderson ganó el primerio Nobel en Física en 1932 y en 1936 por su descubrimiento del positrón y el muón respectivamente usando la cámara de Wilson. En la figura 1 (derecha) se muestra una fotografía del positrón detectado por Anderson. Pueden verse dos trazas curvadas, una de ellas es un electrón, la otra tiene aproximadamente la misma densidad de ionización y curvatura pero con signo contrario por lo que tendrá la misma masa que el electrón pero carga opuesta.

En 1936 Alexander Langsdorf mejoró la cámara de niebla de Wilson sustituyendo el mecanismo de expansión adiabática por un gradiente térmico entre dos superficies planas. De esta manera, consiguió un medio activo de aire sobresaturado en la zona fría de la cámara de forma permanente. Este tipo de cámaras de niebla se llaman cámaras de niebla de difusión y ha sido la construida en este TFG.

4. Fundamentos teóricos

4.1. Funcionamiento de una cámara de niebla de difusión

En su forma más sencilla, una cámara de niebla es un entorno cerrado que contiene vapor de agua superenfriado y supersaturado. Cuando una partícula cargada de suficiente energía interacciona con el vapor, lo ioniza. Los iones resultantes actúan como núcleos de condensación, alrededor de los cuales se forman gotas de líquido que dan lugar a una niebla. Al paso de las partículas cargadas se va produciendo una estela o traza, debido a los numerosos iones producidos a lo largo de su trayectoria (figura 4.1).

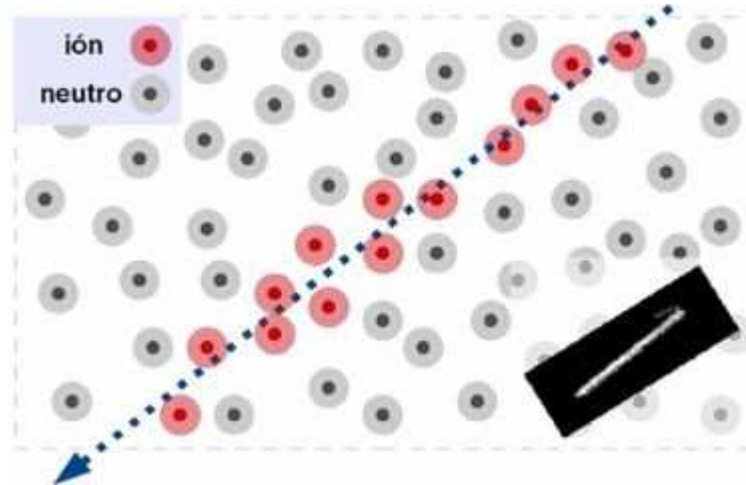


Figura 2: Esquema de formación de traza

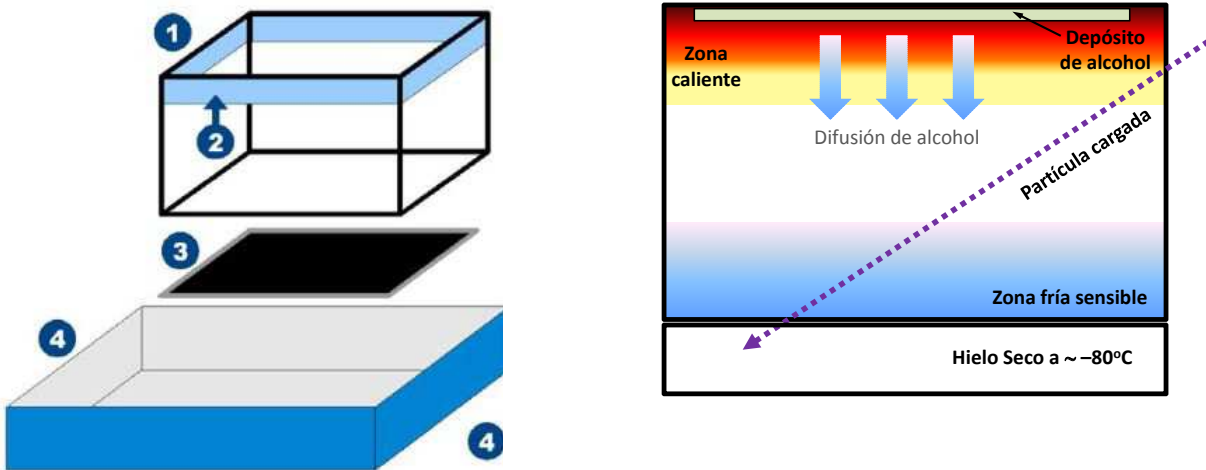


Figura 3: Esquema de cámara de niebla. (1) cuerpo de la cámara; (2) depósito de alcohol; (3) base de la cámara; (4) depósito de hielo seco.

Es importante señalar que si la partícula que atraviesa la cámara no está cargada no ionizará el medio y por lo tanto no dejará traza. Es frecuente usar alcohol de isopropil en lugar de vapor de agua porque el isopropil tiene una baja presión del vapor lo que hace que se evapore con facilidad, y una baja energía de ionización, por lo que es más fácil que se ionice. Para conseguir estas condiciones suele usarse una pecera, a la que se pega una banda de fieltro en

su base que se empapará con isopropil, la pecerá se coloca boca abajo sobre una placa metálica y se sella para poder mantener una atmosfera supercondensada en el interior. Por último se coloca todo el conjunto sobre hielo seco para establecer un fuerte gradiente de temperatura (ver figura 3).

La parte superior de la cámara se encuentra a temperatura ambiente por lo que el isopropil que empapa el filtro se evapora fácilmente y desciende a zonas más frias. Según se acerca a la base de la cámara se va enfriando hasta entrar en fase supercondensada, en este punto es posible ver pequeñas gotas de isopropil formando una niebla poco espesa. La zona efectiva de detección, es decir, donde pueden verse trazas, es de apenas un centímetro de altura, así y todo pueden verse trazas claramente.

Debe tenerse en cuenta que aunque esta cámara tenga se caracterice por tener un funcionamiento continuo esto no es exactamente así ya que cuando una traza se forma una pequeña región alrededor de ella no estará en fase supercondensada por un breve lapso de tiempo, hasta más alcohol llegue a esa zona y se condense. Esto puede producir que una traza se corte repentinamente cerca de otra que se formó poco antes y vuelva a continuar un poco más lejos.

4.2. Bethe–Bloch

Dos efectos caracterizan principalmente el paso de partículas por la materia:

1. Colisiones inelástica con electrones atómicos del material. En este tipo de colisiones la partícula que impacta transmite parte de su energía a un electrón y, dependiendo del tipo de colisión puede ionizarse (colisiones fuertes) o simplemente excitarse (colisiones débiles), si las colisiones son lo suficientemente fuertes puede transmitirse tanta energía al electrón que puede producir ionizaciones secundarias (rayos delta). Son las colisiones más frecuentes y principales responsable de la pérdida de energía de partículas al pasar a través de materia. Aunque cada colisión hace que la partícula pierda una fracción muy pequeña de su energía este es un proceso acumulativo y el número de colisiones por unidad de distancia recorrida es tan grande que una partícula puede perder casi toda su energía en materiales realmente delgados. Por ejemplo, un protón de 10 MeV perderá todo su momento en tan solo 0.25 mm de cobre.
2. Colisiones elásticas con el nucleo. En este tipo de colisiones la partícula que impacta es desviada de su dirección inicial. Mediante este mecanismo también se transmite una pequeña parte de la energía pero es prácticamente despreciable, esto es debido a que la masa de las partículas que impactan es muy inferior frente a la de los nucleos. En situaciones en las que esto no es así, como puede ser una partícula alfa chocando con un nucleo de hidrógeno, se pierde una mayor cantidad de energía pero sigue siendo mucho menor que la perdida por colisiones inelásticas con los electrones.

Bethe–Bloch fué el primero en realizar los calculos mecano cuánticos necesarios para parametrizar la energía perdida por unidad de distancia recorrida es función del momento. La fórmula que dedujo se encuentra es la siguiente (asumiendo unidades naturales con $c = 1$):

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = z^2 K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} + \frac{1}{8} \frac{Q_{max}^2}{(\gamma M)^2} \right]$$

$$K = 4\pi r_e^2 m_e = 0,307075 \text{ MeV cm}^2 / g.$$

I: potencial de excitación medio. Para el aire se tiene $I=85.7 \text{ eV}$.

Z: Numero atómico del medio.

A: Número másico del medio. Para el aire se tiene $Z/A=0.49919$.

ρ : Densidad del medio. Para el aire se tiene $\rho = 1,205 \cdot 10^3 \text{ g/cm}^3$.

$\beta = v/c$ es la velocidad de la partícula incidente.

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

donde la corrección del efecto de la densidad (δ) y la corrección de capas (\bar{C}) fueron añadidos con posterioridad. También se tiene la que Q_{max} es la energía cinética máxima transferida, es decir, la asociada a un rayo delta y se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{max} = \frac{2m_e\beta^2\gamma^2}{1 + 2\gamma\frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}$$

La corrección δ depende del material de la siguiente forma:

$$\delta = \begin{cases} 0 & X < X_0 \\ 4,6052X + \bar{C} + a(X_1 - X_0)^m & X_0 < X < X_1 \\ 4,6052X + \bar{C} & X > X_1 \end{cases}$$

Donde $X = \log_{10}(\beta\gamma)$ y $\bar{C} = 2\ln\left(\frac{I}{\hbar\omega_p}\right) + 1$.

El término $\hbar\omega_p$ se denomina energía del plasma tiene el valor $\hbar\omega_p = 28,816\sqrt{\rho\langle Z/A\rangle}eV$, expresando la densidad en g/cm^3 . El resto son parámetros que dependen del medio y cuyos valores para *aire* son [1][2]: $\bar{C} = 10,6$, $X_0 = 1,742$, $X_1 = 4,28$, $m = 3,4$, $a = 0,1091$.

Esta fórmula no es válida para el caso de electrones y positrones ya que con estos hay que añadir el efecto de que se produce choques con partículas idénticas y desde el punto de vista cuántico no es posible distinguir si el *scattering* se produce con un ángulo ϕ ó $\phi - \pi$. Para tener esto en cuenta en la fórmula es necesario usar las secciones eficaces de Moller para tener en cuenta la gran cantidad de energía que pierde el electrón por colisiones con los electrones atómicos y la sección eficaz de Bhabha para tener en cuenta el *scattering* de partículas idénticas. Con estas correcciones la fórmula de Bethe-Bloch para electrones y positrones tiene la siguiente forma:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{1}{2}K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln\left(\frac{m_e^2\beta^2\gamma^2(\gamma-1)}{2I^2}\right) + 2\ln(2) - \frac{\beta^2}{12} \left(23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3} \right) - \delta \right]$$

Es necesario señalar que la fórmula de Bethe-Bloch sólo es válida para el caso en que $\beta\gamma > 0,1$, (lo que implica valores del momento superiores a $p = \gamma Mv = \gamma M\beta = 0,1M \implies p = 0,1M$) ya que por debajo de este valor se obtienen resultados ilógicos como el hecho de que las partículas ganan energía en lugar de perderla. Esto es tenido en cuenta al programar la fórmula de Bethe-Bloch en nuestro código de simulación.

4.3. Radiación ambiental

Las partículas que se observan en una cámara de niebla tienen dos fuentes:

- **Radiación terrestre.** La mayor parte de esta radiación se debe a elementos radiactivos cuya vida media es comparable a la vida de la tierra como el Uranio-238 y 235 y el Torio, este tipo de desintegraciones producen en su mayoría partículas alfa y beta.
- **Fondo cósmico.** Los rayos cósmicos primarios están formados por un 86% de protones, un 11% de partículas alfa, un 1% de núcleos pesados y un 2% de electrones, estos rayos primarios pueden llegar a tener una energía de $10^{20}eV$ aunque con tanta energía son sucesos poco frecuentes. Por el impacto de estas partículas con la atmósfera se forman los rayos secundarios que están compuestos en su mayoría por muones, piones, protones, neutrones, electrones, positrones y neutrinos (figura 4). Dada la penetración y vida media de los muones estas serán las partículas de los rayos cósmicos que predominarán a nivel del mar.

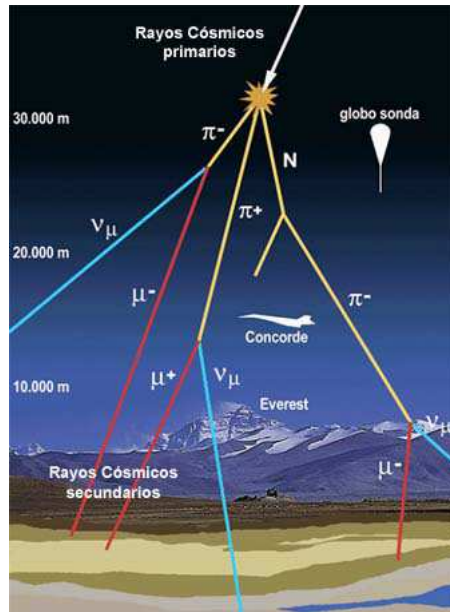


Figura 4: Ilustración de un rayo cósmico interaccionando en la atmósfera terrestre.

Ahora se describirá con más detalle cada una de las partículas que dejan traza en la cámara de niebla, que son las partículas de interés:

1. **Electrones y positrones.** Estas partículas tienen una masa de 0.5 MeV, son muy poco ionizantes por lo que sus trazas son largas y delgadas pero con numerosos cambios bruscos de dirección. Un electrón o positrón con un momento de 0.1 MeV dejará una traza de unos 10 cm, partículas con este momento provienen de desintegraciones y se les suele llamar betas. También pueden proceder de rayos cósmicos en cuyo caso tienen momentos superiores al GeV y su traza pasa a ser recta y larga. Si son suficientemente energéticas pueden ionizar átomos a su paso que emitirán electrones con energía suficiente como para dejar una pequeña traza, esto se conoce como rayos delta: trazas rectas con pequeñas ramificaciones. También es posible que un fotón se desintegre en un electrón y un positrón, en la cámara se vería como una V simétrica, ya que el fotón no deja traza por carecer de carga y masa y el electrón y el positrón se reparte de igual forma la energía del fotón.
2. **Protones.** Los protones que se observarán proceden de rayos cósmicos secundarios y tienen una masa de 938 MeV, su energía de ionización es 100 veces superior a la de los electrones y positrones con el mismo momento por lo que tendrán trazas rectas y más gruesas. Los protones con momentos superiores al GeV apenas dejan energía en la cámara y dejan trazas rectas y finas mientras que los que mejor se ven son los de 6 MeV cuyo alcance es de unos 40 cm.
3. **Muones.** Estas partículas, con una masa de 105.6 MeV, forman el 90% de los rayos cósmicos secundarios y llegan a la Tierra con un momento de unos 4 GeV. Debido a esta alta energía apenas ionizan el medio por lo que su traza será recta y fina que atraviesa la cámara de punta a punta, esto hace que sea difícil distinguirlos de electrones y protones energéticos. Puede producirse que un muón se desintegre a un neutrino del muón, un antineutrino del electrón y un electrón, este último es el único de los productos finales que deja traza y su dirección será distinta a la del muón por lo que el resultado será una L con un brazo ligeramente más intenso que el otro.
4. **Partículas alfa.** Están formadas por dos protones y dos neutrones, suelen referirse a núcleos de Helio. La masa de una partícula alfa es de 3.72 GeV y su carga eléctrica es +2e. Se producen principalmente por la desintegración de isótopos radiactivos pesados y su momento está comprendido entre 4 y 8 MeV. Debido a su gran masa a que su carga eléctrica es el doble que las otras partículas son partículas muy ionizantes por lo que perderán su energía rápidamente por lo que dejarán trazas gruesas y cortas, de entre 4 y 7 cm, mucho más luminosas y gruesas que las de los protones. Las partículas alfa que pueden observarse en la cámara de niebla tendrán tres fuentes principales:

- La fuente de *Americio-241* que se introduce en el interior de la cámara y que tendrá una gran actividad. El Americio-241 se desintegra a Neptunio-237 que puede considerarse estable por que las trazas de esta fuente serán líneas rectas y cortas.
- Desintegración del *radón atmosférico*. El Radón-226 puede desintegrarse a Renio que a su vez puede desintegrarse a Renio-222 y este a Polonio-218 y todas las desintegraciones son alfa, esto produce que las desintegraciones de esta cadena formen dos trazas, una detrás de otra que forman una V debido a las desintegraciones sucesivas. Como no es un elemento muy común en la atmósfera este tipo de trazas serán escasas.
- *Rayos cósmicos*. Para que una partícula alfa cruce toda la atmósfera sin interactuar con ella deberá tener una energía de 1 TeV, una partícula alfa de esta energía dejará una traza gruesa y bastante larga. Este tipo de trazas son muy raras.

En la figura 5 pueden verse gráficos realizados a partir de la programación de la fórmula de Bethe–Bloch que corresponden a la energía perdida por unidad de longitud recorrida para varias partículas en función de su momento, y la distancia que recorren esas partículas en aire. Cabe destacar que como la fórmula de Bethe–Bloch no es válida si $p < 0,1M$ el gráfico del rango tiene un error de algunos metros ya que se considera que la partícula se detiene cuando en realidad aún tiene momento suficiente como para seguir avanzando una distancia apreciable. Para mayor precisión, en la distancia recorrida deben usarse datos experimentales de la energía perdida.

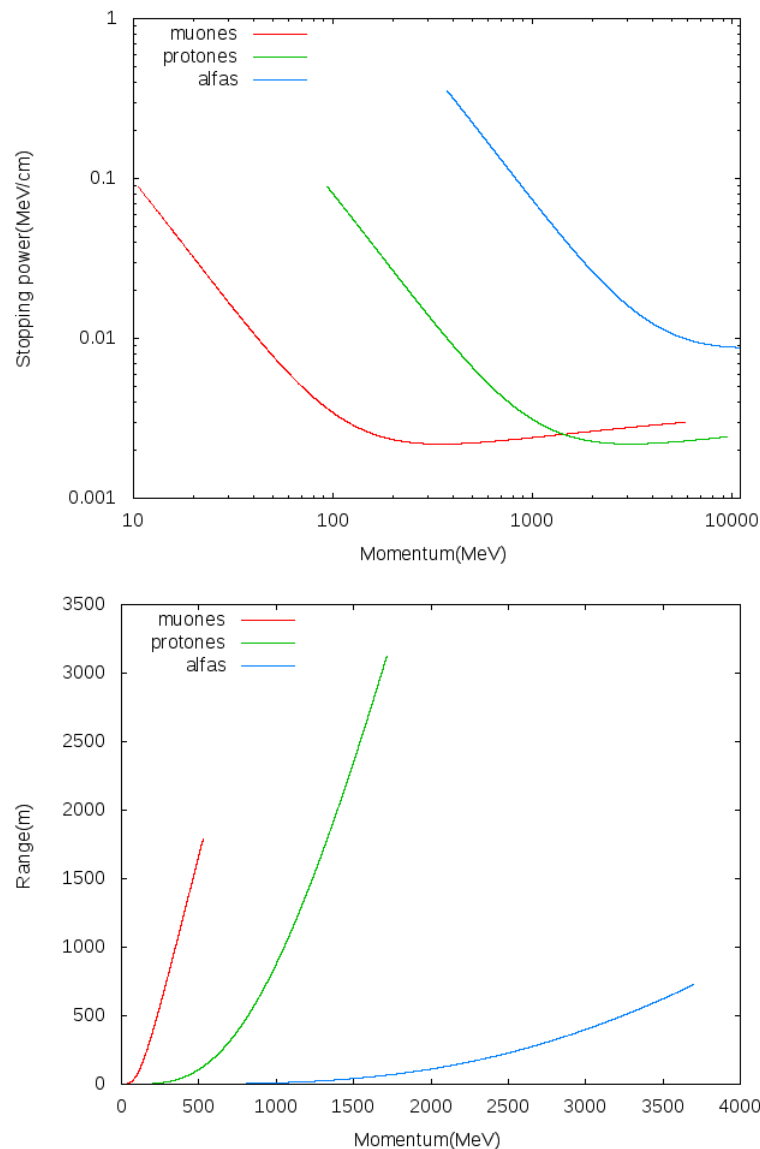


Figura 5: Poder de frenado (izquierda) y Rango (derecha) para muones, protones y partículas alfa.

5. Montaje experimental final de la cámara de niebla

Esta sección se centrará en describir la construcción de la versión final de la cámara de niebla, mostrada en la figura 5. Para llegar a este resultado fué necesario construir una serie de prototipos con objeto de hacer pruebas de principios. La construcción, puesta en funcionamiento y conclusiones de estos prototipos se describen en detalle en el apéndice A.



Figura 6: Versión final de la cámara de niebla elaborada en este Trabajo Fin de Grado.

5.1. Estructura básica

En el apartado 3.2 se hizo una descripción superficial de las partes que componen una cámara de niebla básica, en esta sección se describirán en más detalle cada una de ellas y se argumentará el motivo de su uso, también se propondrán algunas alternativas:

- **Pecera.** La pecera es el bloque base, sobre el cual se montará cualquier añadido, su función principal es aislar la atmósfera creada en el interior de la cámara de niebla del exterior. Cuanto mayor sea su anchura se tendrá mayor volumen efectivo pero también se necesitará una mayor cantidad de alcohol. No es necesario que sea demasiado alta, pero sí lo suficiente como para que la parte superior de la cámara, donde se encuentra el isopropil, esté a una temperatura lo suficientemente elevada como para evaporarse. Se recomienda el uso de una pecera convencional ya que puede encontrarse por un módico precio en cualquier tienda de animales y tiene unas dimensiones adecuadas (la pecera que se ha usado para construir la cámara de niebla tiene unas dimensiones de 19x34x19 cm), además las peceras son muy transparentes y fáciles de limpiar para mantener una buena visión. En caso de no disponer de pecera pueden usarse tarros de cristal anchos (como los de las aceitunas) o una vaso de cubalitra, el problema de estos recipientes es que sus paredes son curvas y no demasiado bien pulidas por lo que dificultan la observación.
- **Placa metálica.** Lo óptimo sería colocar la pecera boca abajo directamente sobre el hielo seco, consiguiendo así que la temperatura en toda la cámara fuese menor y aumentando la zona efectiva de detección, sin embargo, al ser el hielo seco de color blanco no se distinguirían las trazas, tampoco se conseguiría un buen sellado en la zona inferior de la cámara. Para resolver estos problemas se usa una placa metálica y se ha pintado de negro

mate, con esto se tiene un buen fondo sobre el que distinguir fácilmente las trazas y conseguir un buen sellado. La pintura tiene el inconveniente de que se disuelve con alcohol, durante la observación esto no es un problema pero al finalizarla la placa queda bastante estropeada y hay que volver a pintarla, una alternativa a la pintura es usar cinta aislante negra, hay que pegarla de modo que no se creen arrugas y al empaparse con alcohol refleja la luz, además de ser también aislante térmico, pero no se despegará hasta muchas medidas después. Se usa una placa de metálica porque los metales tienen buena conductividad térmica y hacer el aunque la cámara no esté directamente sobre el hielo seco al menos la base metálica esté a una temperatura similar. Se recomienda el uso de una placa de aluminio ya que este material no es demasiado caro e incluso pueden conseguirse retales gratis o muy baratos en tiendas de marcos de ventanas. Si quiere mejorarse aún más la conductividad puede usarse una placa de cobre con $\sigma_{cobre} = 380 \frac{W}{K \cdot m}$ frente a la conductividad del aluminio que es $\sigma_{aluminio} = 209 \frac{W}{K \cdot m}$, sin embargo una placa de cobre es mucho más cara.

- **Bandas de fieltro.** Se necesita un depósito de isopropil en la parte superior de la cámara que permita almacenar una cantidad suficiente como para permitir una observación continuada de al menos una hora de duración. El fieltro es un material que puede almacenar una gran cantidad de líquido antes de gotear, es un material plano lo que hace que su superficie efectiva sea toda la banda y la evaporación sea más fácil, puede encontrarse en cualquier ferretería y los hay que tienen una cara adhesiva para facilitar su pegado, de todos modos se recomienda usar algún pegamento fuerte como el cianocrilato ya que las bandas de fieltro estarán empapadas de alcohol capaz de disolver pegamento. Otras alternativas pueden ser: usar esponjas (pero no son capaces de almacenar tanto alcohol y su superficie efectiva es pequeña en comparación con su volumen) o un depósito como una placa Petri (este método requiere de una fuente de calor externa para facilitar la evaporación, una forma fácil de rellenar el depósito como un agujero en la cámara y una buena sujeción que evite el recipiente pueda caerse).

5.2. Dispensador de alcohol

En este apartado se describe brevemente otra alternativa a las bandas de fieltro que permite una recarga de alcohol fácil y rápida de isopropil en cualquier momento, incluso durante la observación, y asegura un reparto equitativo del vapor del alcohol por toda la cámara. Este método consiste en sustituir las bandas de fieltro por tela de bayeta la cual es más barata y fácil de encontrar:

- La bayeta se colocó en el bastidor de costura tirante y se recortó el sobrante.
- Se recortó un tubo de silicona cuya longitud fue superior al perímetro interno del bastidor y se agujereó todo excepto las puntas que sobresalían con ayuda de una aguja.
- Usando cianocrilato se pegó el tubo al borde interior del bastidor con la bayeta (figura 7, izquierda).

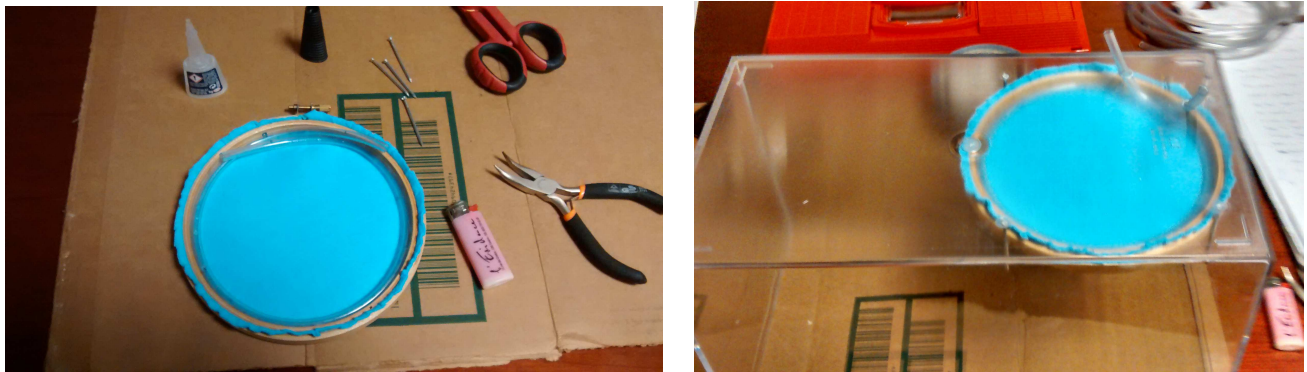


Figura 7: Dispensador de alcohol antes (izquierda) y después (derecha) de montarse en la cámara.

- Para montarlo en la cámara se pegaron cuatro puntillas en el borde del bastidor con la cabeza apuntando hacia arriba, se practicaron dos orificios en el techo de la cámara para sacar los tubos y por último, se echó una gota

de pegamento en cada cabeza de las puntillas y se pegó a la cámara, sacando antes los tubos por los orificios (figura 7, derecha).

El proceso se repitió para colocar un segundo dispensador en la cámara (no estrictamente necesario) con el fin de aumentar la superficie de *lluvia* de alcohol cuando la cámara estuviese en funcionamiento. Para una descripción más extensa de los pasos a seguir para la construcción de esta mejora así como de los prototipos que la precedieron consúltese el apéndice B.

5.3. Muestra radiactiva

Es posible que involuntariamente se coloque la cámara en una zona donde llegan pocas partículas provenientes de los rayos cósmicos, hay poca radiación ambiente o las partículas que cruzan la cámara son tan poco energéticas que apenas puede verse sus trazas, cualquiera de estos hechos podría interpretarse erróneamente como un defecto en la cámara de niebla. Para evitar errores de este tipo se recomienda introducir una fuente radiactiva cuya actividad sea alta en el interior de la fuente ya que esta siempre emitirá partículas y podrá saberse con certeza si la cámara funciona correctamente o no. Las fuentes de gammas no dejarán trazas cerca de ella ya que los fotones, al ser neutros, no ionizan el medio, pero si se desintegran en un par electrón positrón puede verse una V lejos de la fuente. Las fuentes de betas dejarán largas trazas pero tenues. La fuente usada en la cámara es una muestra de Americio-241 que emite alfas, estas partículas dejan una trazas corta pero muy intensa lo que las hace ideales para ver con claridad si la cámara funciona y no confundirla con radiación ambiental o rayos cósmicos ya que estas trazas sólo ocuparán una pequeña región de la cámara dejando el resto libre.

En los primeros prototipos de la cámara la fuente se colocaba en la cámara usando un trozo de plastilina. Para el diseño final se usó un clip que se ha doblado convenientemente y pegado a la cámara usando cianocrilato de modo que la fuente radiactiva pueda pegarse a él usando *blutack* (compuesto similar a la plastilina con una adherencia muy superior). Además, para brindar al usuario la oportunidad de “desactivar” la fuente se ha colocado una compuerta construida con un palo metálico de pinchito el cual tiene en el extremo cerca a la fuente un trozo de madera para taparla y en el extremo que sale de la cámara un pequeño agarre que facilita girarla. Además, a modo de guía se ha colocado un tapón de bolígrafo en la cámara donde introducir la punta del pincho al cerrar la cámara, esto evita que la compuerta se salga de su posición. La foto de la izquierda en la figura 8 muestra el dispositivo descrito.



Figura 8: Izquierda: Soporte de fuente radiactiva y compuerta. Derecha: Prototipo de termistores.

5.4. Medidor de temperatura

Se sabe que es necesario que la parte inferior de la cámara esté fría y la parte superior caliente pero no se conoce a partir de qué temperatura empiezan a verse trazas, ni el gradiente que se crea, para resolver este problema se pusieron varios sensores de temperatura a distintas alturas. Los sensores de temperatura que se usaron fueron termistores, estos presentan la ventaja de ser más baratos que termómetros y sondas Fluke. A continuación se dará una descripción de los termistores utilizados.

5.4.1. Termistores

Un termistor es un sensor resistivo de temperatura. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. El término termistor proviene de Thermally Sensitive Resistor. Existen dos tipos de termistor:

- NTC (Negative Temperature Coefficient) con un coeficiente de temperatura negativo.
- PTC (Positive Temperature Coefficient) con un coeficiente de temperatura positivo.

De modo que, cuando la temperatura aumenta, los tipo PTC aumentan su resistencia y los NTC la disminuyen de forma exponencial. En la cámara se usaron termistores NTC.

Se hizo un primer prototipo usando dos termistores NTC de 10k (resistencia a 0°C) soldados a unos cables finos que pasaban por una guía construida a partir de una lámina de plástico y algunas grapas a modo de agarraderas, el otro extremo de los cables se pasó por un orificio en la parte superior de la cámara y se soldó a clavija extraída de una fuente de alimentación de ordenador y se usó unos dientes de cocodrilo para medir la resistencia con un polímetro. También se colocó una sonda de Fluke a la misma altura que uno de los termistores para calibrarlo como se muestra en la fotografía de la derecha en la figura 8. Para mayor información acerca de su construcción y calibrado consúltese el apéndice C.

Este sistema de medida de temperatura presenta como inconvenientes que requiere tantos polímetros como termistores o tomar medidas de la resistencia de uno en uno y además con estos valores habría que calcular la temperatura bien a mano o bien usando un ordenador al que hay que introducirle los datos a mano. Para solventar estos problemas se recurrió a usar una placa de **Arduino**, de la que se hablará en el siguiente punto, esto permitió el uso de termistores digitales los cuales necesitan conectarse a un dispositivo electrónico específico, como una placa de **Arduino**, pero a cambio en lugar de un valor de resistencia dan directamente el valor de la temperatura. Estos termistores poseen una memoria interna de 64 bits en los que se almacena su dirección, lo que permite que puedan conectarse varios termistores a un mismo pin sin errores de medidas, el valor de la medida, unos bits para una comprobación CRC y alarmas en el caso de que se superen algunos valores de temperatura predefinidos. La medida la almacena en 16 bits de los cuales 4 están reservados para decimales por lo que el error de medida de los termistores digitales es de $2^{-4} = 0.625^\circ\text{C}$. Debe usarse hexadecimal para transmitirle las instrucciones de encendido, tomar medida y dar medida.

Los termistores digitales usados fueron del modelo DS18S20, que tienen dos modos de funcionamiento:

- *Normal*. El pin de un extremo se conecta a tierra, el del otro extremo se conecta a +5V y el central a un pin digital de **Arduino**. En este modo el termistor se mantiene en todo momento encendido lo que puede hacer que se caliente un poco si el funcionamiento es prolongado.
- *Parásito*. Se puentea los pines de los extremos a tierra y el central se divide en dos salidas, una se conecta a +5V con una resistencia de $4.7k\Omega$ y la otra se conecta a un pin digital de **Arduino**. En este modo debe dejarse un segundo entre que se le da la instrucción de activación al termistor y se hace una medida para que la energía necesaria para efectuar la medida se almacene en una capacidad interna. En este TFG se usó este modo. La figura 9 indica cómo se debe conectar el termistor en modo parásito.

Si se desea una mayor comprensión acerca del funcionamiento y características de estos termistores consúltese el Datasheet [6].

Por otro lado se usaron también dos termistores analógicos NTC cuyo Datasheet puede consultarse en la referencia [7]. Se escogieron termistores NTC para que la resistencia pudiese aumentar tanto como fuese necesario al disminuir la temperatura, si se hubiesen escogido PTC el valor de la resistencia no habría podido variar tanto y el ajuste sería menos preciso. Debido a cómo funciona **Arduino** se usó un divisor de tensión como el que indica la figura 10 para calcular la resistencia del termistor conociendo el voltaje en cada punto.

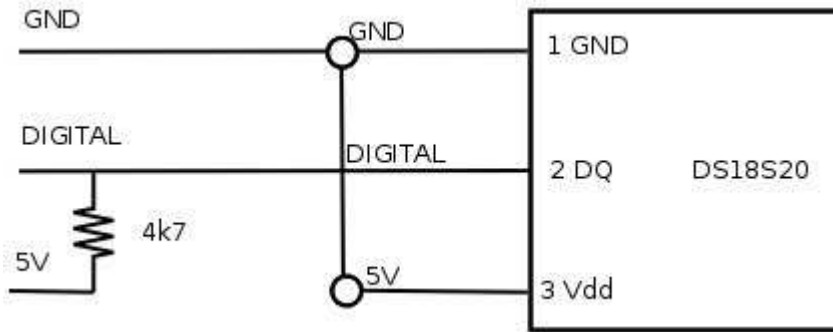


Figura 9: Esquema de un termistor digital conectado en modo parásito.

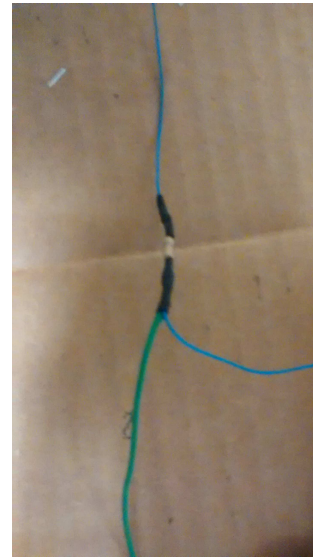
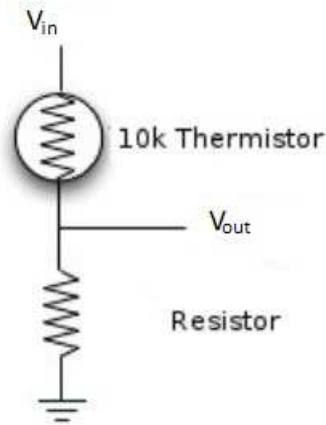


Figura 10: Esquema y realización del divisor de tensión del termistor.

Para obtener la fórmula de la resistencia en función del voltaje se usa la ley de ohm y el hecho de que la intensidad que recorre las dos resistencias es la misma que recorre la resistencia inferior. Llamando R_T a la resistencia del termistor y R a la resistencia fija:

$$I = \frac{V_{in}}{R_T + R} = \frac{V_{out}}{R} \quad \Rightarrow \quad R_T = \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \right) R$$

Se escoge una resistencia de $10\text{ k}\Omega$ para el divisor de tensión de modo que su valor sea similar a la del termistor.

En el circuito real se conectó un cable de los termistores digitales a tierra y el otro con dos salidas, una al pin de **Arduino** y la otra a una resistencia y de ahí a $+5\text{V}$, para los termistores analógicos el montaje es el mismo pero intercambiando tierra y $+5\text{V}$ (figura 10).

En todas las conexiones se usó cable termorretractil para evitar que se produzca cortocircuitos y para hacer más fuertes las soldaduras. Al igual que en el prototipo se usó una guía de plástico con grapas a modo de abrazadera para pasar los cables de los termistores, estos se pegaron a dintintas alturas del suelo de la cámara como indica la figura 11:

- Un termistor digital se colocó en contacto con la placa.

- Un termistor analógico se colocó a la misma altura que el anterior para tener dos medidas para contrastar datos ya que esta es la zona más importante.
- Un termistor digital a $0.6 \pm 0,1$ cm de la base de la cámara.
- Un termistor analógico a $1.3 \pm 0,1$ cm de la base de la cámara.



Figura 11: Termistores y cableado montados en la cámara.

5.4.2. Arduino

Arduino [14] es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. El lenguaje de programación está basado en C++. Hay diversas placas de Arduino que varían en función de la cantidad y tipo de salidas que poseen, la elegida para este TFG ha sido Arduino UNO de la que se puede ver un esquema en la figura 12.

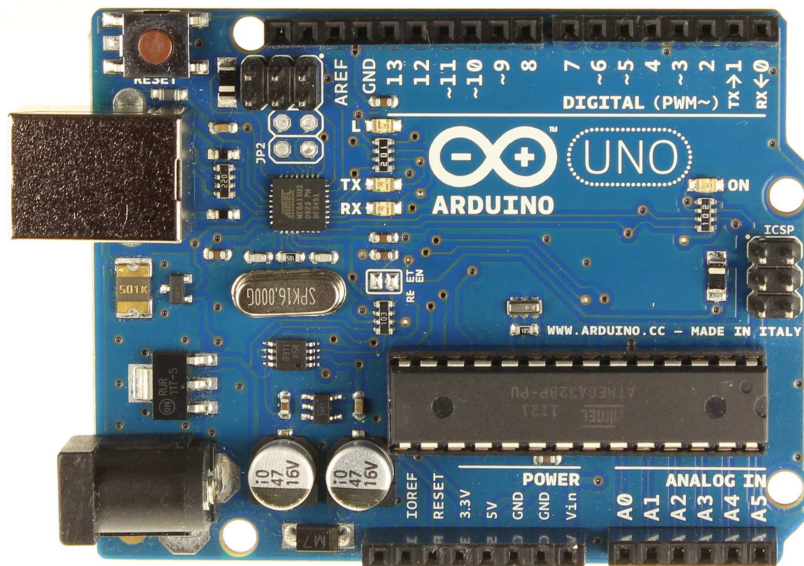


Figura 12: Esquema del módulo Arduino UNO [14].

Una vez escrito el código del programa debe cargarse en la placa de **Arduino** usando un cable USB, tras esto la conexión con el ordenador tan solo sirve para alimentar la placa ya que el programa se ejecuta desde ella.

Arduino tiene 5 tipos de entradas/salida:

- *Pines analógicos.* Leen un voltaje comprendido entre 0 y +5V y lo almacenan en un byte o escriben una señal que varía entre 0 y +5V, el tiempo que esté en cada uno de los estados depende del valor que se quiera escribir, es decir, no permite escribir valores distintos a 0 y +5V. Una placa de **Arduino UNO** cuenta con 6 pines analógicos enumerados del 0 al 5.
- *Pines digitales.* Se usan para codificar información o como fuentes de voltaje, a ellas pueden conectarse desde LEDs que se apaguen o enciendan a placer hasta dispositivos complejos como LCDs. El modelo **UNO** de **Arduino** cuenta con 14 pines enumerados del 0 al 13, los pines 0 y 1 están reservados para comunicación via USB por lo que no pueden usarse en programas que requieran un comunicación constante con el ordenador y el pin 13 tiene incorporado internamente un sistema de resistencia y LED.
- *USB.* Cable que permite conectar **Arduino** a un ordenador y enviar un programa a la placa o para transferir datos desde **Arduino** al ordenador y viceversa. **Arduino** funciona internamente con puertos COM por lo que el software de **Arduino** vincula internamente el USB al que está conectada la placa con un COM virtual. Cada vez que el puerto COM se ponga en escucha, bien porque se ha abierto el serial port del software de **Arduino** o cualquier otro motivo el programa cargado en la placa se reiniciará.
- *Salidas de voltaje.* **Arduino** tiene un pin de +5 V y otro de +3.3 V para alimentar dispositivos externos.
- *Tierras.* **Arduino UNO** cuenta con un total de 3 pines de tierra.

Este apartado se centrará en una descripción del montaje realizado por **Arduino**. Como se dijo anteriormente los termistores se conectaron a la placa de **Arduino** la cual calcula la temperatura a partir de los valores obtenidos, para expresar estos valores se usó un LCD que muestra el valor de la temperatura en grados centígrados de cada termistor. Los valores expresados en el LCD tienen una correspondencia espacial con la posición de los termistores, es decir, la primera medida situada en la parte superior izquierda del LCD corresponde al termistor colocado en la parte superior izquierdo mirando de frente la cámara. Para una comprensión más profunda del LCD así como de sus conexiones con **Arduino** consúltase el Datasheet [15]. Con objeto de saber a simple vista el estado de la cámara se conectaron 3 LEDs rojo, verde y azul que se enciende si la temperatura es demasiado alta para ver partículas, si pueden verse algunas trazas o si la temperatura es óptima para ver trazas respectivamente.

Cada componente se probó por separado junto con su programa de **Arduino** montándolo todo sobre una protoboard, tan sólo al final se soldaron todos cables. En la figura 13 se muestra un esquema de todas las conexiones anteriores.

Como se ha dicho anteriormente la resistencia que llevan los termistores analógicos tiene un valor de $10k\Omega$ y la de los digitales es de $4,7k\Omega$. Todos los leds están conectados a una resistencia común ya que como en todo momento sólo habrá un led encendido no es necesario una para cada uno. El pin 3 del LCD está conectado a una potenciómetro (resistencia variable) de $20k\Omega$ lo que permite variar el contraste de la pantalla para una óptima visualización de la temperatura, en caso de no disponer de potenciómetro se puede conectar el pin 3 directamente a tierra.

Debido a que una gran cantidad de cables se conectaban a tierra y otra gran cantidad a +5V en el esquema se ha simplificado poniendo un punto rojo cualquier cable que se conecte a +5V y uno negro a cualquiera que se conecte a tierra. En el montaje real todos estos cables se unen con una ficha de empalme como se muestra en la figura 14. En circuitos tan complejos como este se recomienda escribir en cada cable el pin al que va conectado para poder reconectarlo en caso de desconexión involuntaria.

Por último, para facilitar el análisis de los datos se programó **Arduino** para que enviase via USB los datos de las temperaturas de los termistores y el tiempo transcurrido desde que empezó la toma de datos. El programa elaborado puede consultarse en el apéndice D.

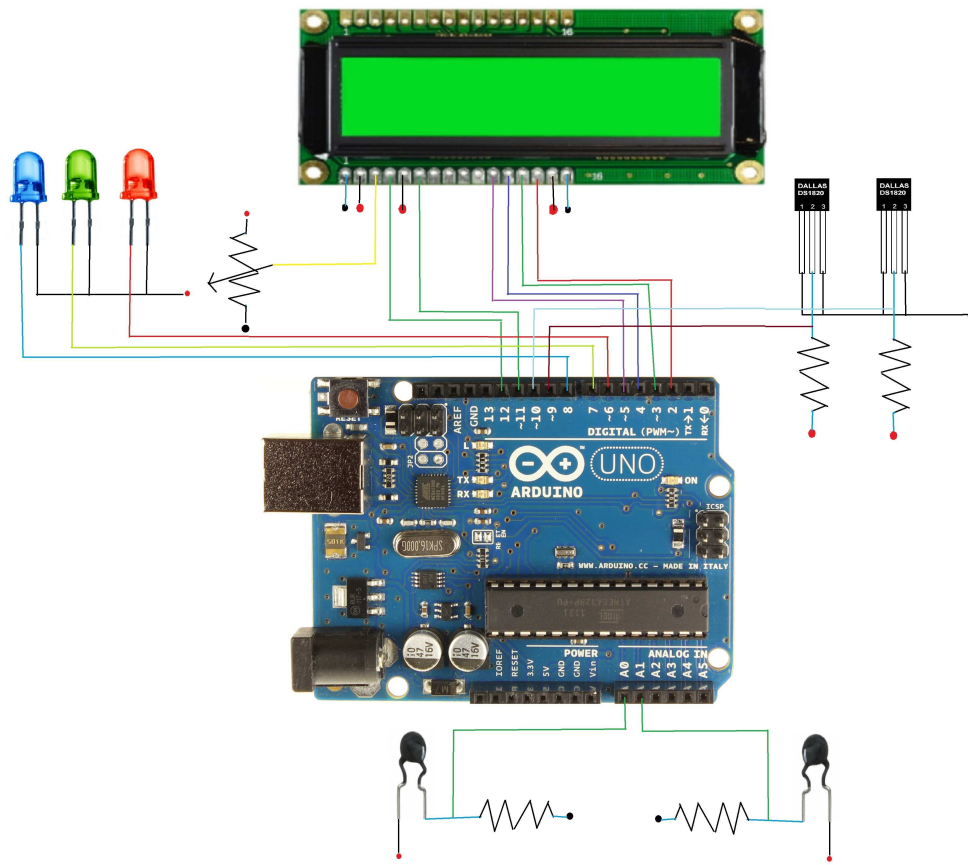


Figura 13: Esquema del montaje final del módulo Arduino para la lectura de termistores digitales y analógicos, el encendido de las alertas de LEDs y el display LCD.



Figura 14: Detalle de las fichas de empalme.

5.4.3. Terminal avanzado y ROOT

Arduino es un dispositivo externo al ordenador por lo que no tiene privilegios para crear ficheros y almacenar información, para esto es necesario usar un programa que se ejecute en el propio ordenador, lea la información que Arduino envía al USB y lo almacene en un fichero. Esto puede hacerse en casi cualquier lenguaje de programación siendo especialmente fácil en Python gracias a la librería Pyserial, sin embargo, hay una opción aún más sencilla, el

uso de terminales avanzadas. Una terminal avanzada es equivalente a una terminal corriente pero es capaz de realizar muchas funciones sin necesidad de complejos comandos, usando sencillos menus. En este TFG se ha usado la terminal Gtterm 0.99.7-rc1, esta terminal permite seleccionar uno de los puertos del ordenador, en este caso, el puerto al que esta conectado Arduino, leer los datos que manda y mostrarlos en pantalla, además ofrece la posibilidad de grabar esos datos en un fichero. Es importante tener en cuenta que la terminal debe ejecutarse como "root" para que tenga permisos suficientes como para acceder a los dispositivos y crear ficheros.

Este fichero se va rellenando con datos de la medida de temperatura cada 2 segundos, con esto puede crearse una gráfica que indique no solo la temperatura actual sino tambien la tendencia que sigue. Para hacer esto se recurre a un programa llamado ROOT creado por el Cern que permite hacer gráficas y ajustes. ROOT usa un lenguaje de programación basado en C [13].

5.4.4. Calibrado

Los termistores digitales dan directamente el valor de la temperatura en grados centígrados y en el datasheet de los termistores analógicos el fabricante da la fórmula que relaciona la temperatura con la resistencia con unos parámetros en función de la temperatura, de todos modos, esto puede contener errores, para asegurar una buena medida de la temperatura se realizó una prueba de calibrado para todos los termistores. Para esto se hizo el montaje en la placa Arduino de la parte de los termistores, sin LCD ni LEDs, y se cargó un programa que enviaba al ordenador los valores de la temperatura y resistencia medidas por los termistores digitales y analógicos respectivamente cuando se pulsaba cualquier tecla del ordenador. Se unieron todos los termistores y la sonda Fluke de forma que estuviesen lo más cerca posible para que todos midiesen el mismo punto (figura 15).



Figura 15: Termistores agrupados para el calibrado de temperatura.

Para diferenciar entre termistores iguales se marcó con un punto de tippex a uno de ellos y se apuntó a qué pin estaba conectado. Se picó medio kilo de hielo seco en el interior de una caja de corcho blanco y se cerró para que se mantuviese frío. Se conectó el programa y se hizo una primera medida a temperatura ambiente. A continuación se repitieron los siguientes pasos varias veces:

1. Colocar los conjunto de termistores y sonda Fluke en el interior de la caja a una distancia fija del hielo seco y cerrar la caja.
2. Esperar a que se estabilice la temperatura de la sonda Fluke.
3. Tomar una medida de resistencias y temperatura de termistore sy sonda Fluke.

La temperatura puede llegar a tardar en estabilizarse hasta 10 minutos y hay que evitar medidas demasiado cerca del hielo ya que ahí el gradiente de temperatura es muy grande y las pequeñas distancias entre termistores son suficientes para que la temperatura de cada uno sea muy diferente de la de los otros. Los datos obtenidos del calibrado se muestran en la tabla 1.

PT digital 1 ($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$)	PT digital 2 ($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$)	PT analógico 1 ($k\Omega$)	PT analógico 2 ($k\Omega$)	Temperatura ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)
22.94	23.19	$10,8\pm 0,6$	$10,8\pm 0,6$	23.1
21.81	21.69	$11,8\pm 0,6$	$11,6\pm 0,6$	20.6
-7.94	-6.50	49 ± 3	50 ± 3	-7.6
-15.56	-13.56	72 ± 4	74 ± 4	-15
-15.50	-15.00	79 ± 5	81 ± 5	-16.6
-18.81	-16.75	85 ± 5	87 ± 5	-19.2
-28.19	-25.56	141 ± 9	148 ± 10	-28.3
-28.69	-27.69	160 ± 11	161 ± 11	-30.1
-33.0	-32.75	238 ± 17	223 ± 17	-34.1
-33.5	-33.38	240 ± 18	234 ± 18	-35.0

Cuadro 1: Resistencia y temperatura medidos por los termistores, así como la temperatura de la sonda.

Como los termistores digitales dan la temperatura en grados centígrados se ha supuesto que las diferencias con la temperatura real será de tipo lineal por que se ha hecho un ajuste de este tipo:

$$T_{sonda} = T_{PT} \cdot a + b$$

Usando el programa ROOT se hicieron ajustes de la temperatura real en función de la obtenida de los termistores (figuras 16 y 17).

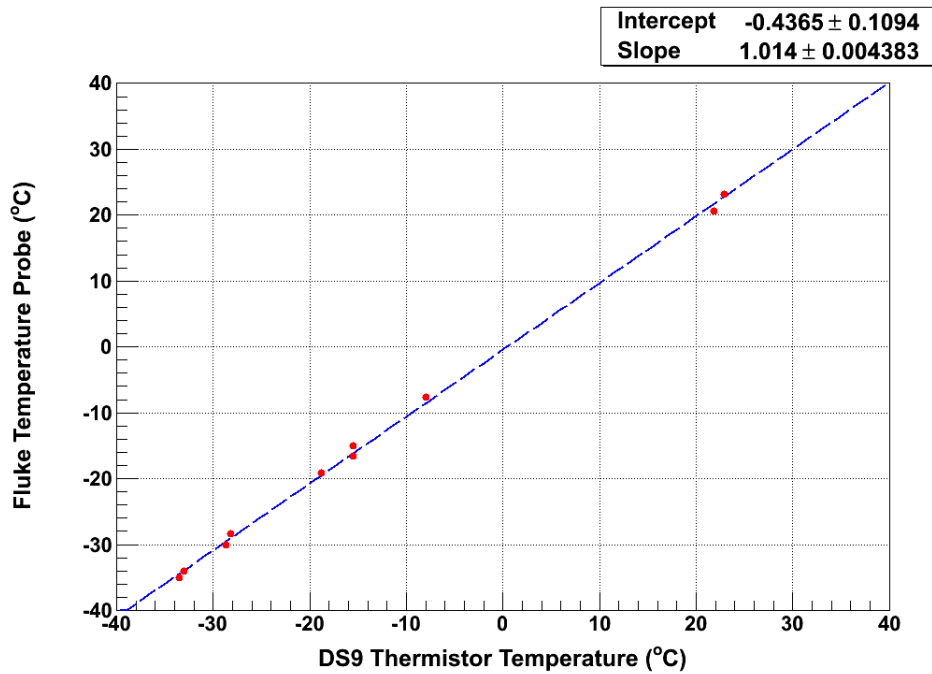


Figura 16: Gráfica de la temperatura de la sonda Fluke frente a la del termistor digital 1.

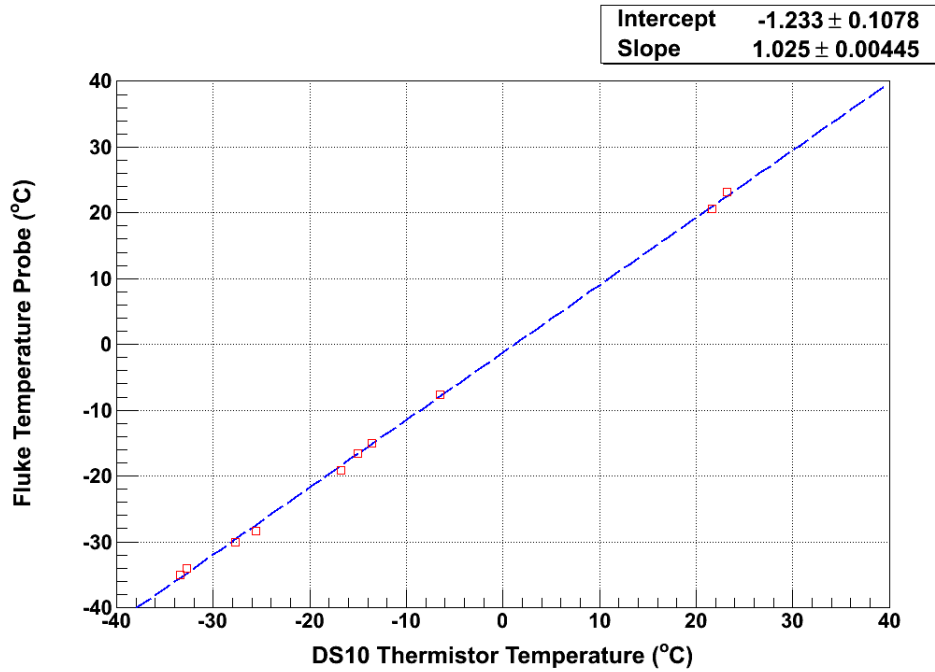


Figura 17: Gráfica de la temperatura de la sonda Fluke frente a la del termistor digital 2.

Como puede verse el ajuste es casi una recta cuyo origen es el cero y cuya pendiente es la unidad, pueden achacarse las diferencias a errores de medida como el hecho de que los termistores y la sonda no estaban en el mismo punto o incluso un error de medida de la sonda Fluke, por lo tanto se considerará que el valor de la temperatura arrojado por los termistores digitales es correcto.

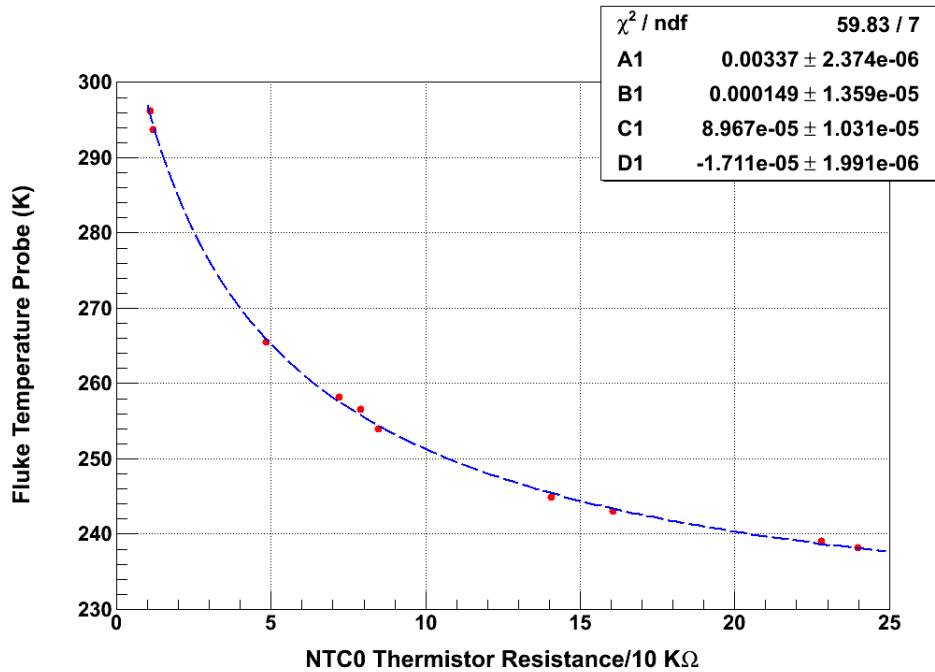


Figura 18: Gráfica de la temperatura de la sonda Fluke frente a la del termistor analógico 1.

Por otro lado, siguiendo las recomendaciones del fabricante se hizo un ajuste del siguiente tipo para los termistores analógicos:

$$T_{sonda} = \frac{1}{A1 + B1 \cdot \ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + C1 \cdot \ln^2\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + D1 \cdot \ln^3\left(\frac{R}{R_{ref}}\right)}$$

Donde se ha tomado $R_{ref} = 10000\Omega$. Con este ajuste y tomando como valores iniciales para las constantes los valores que nos da el fabricante se obtuvieron los ajustes mostrados en las figuras 18 y 19.

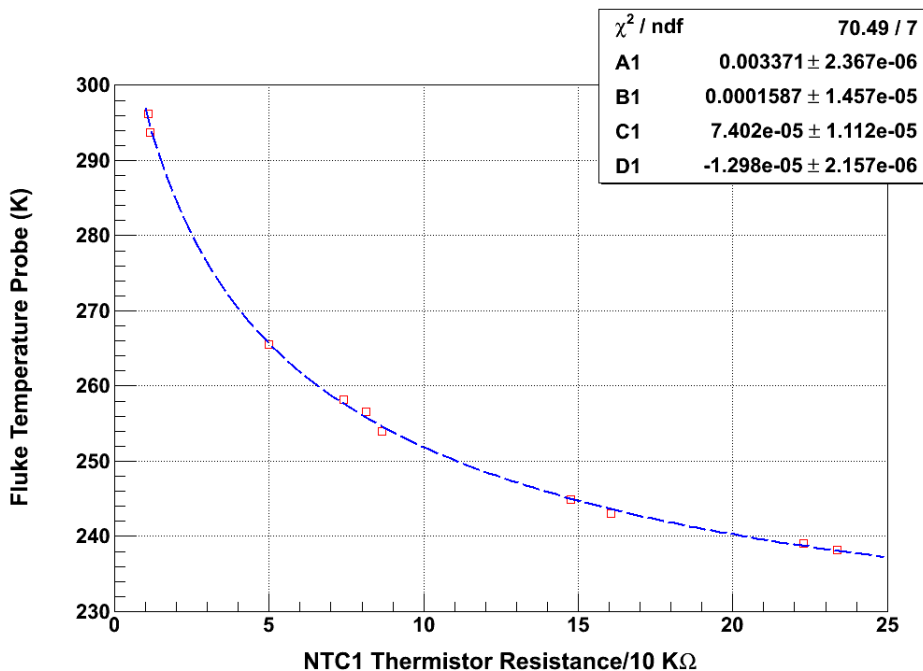


Figura 19: Gráfica de la temperatura de la sonda Fluke frente a la del termistor analógico 2.

Una vez cubiertos los pasos anteriores, la cámara y todos sus añadidos está lista para funcionar.

6. Procedimiento experimental

A continuación se describen los pasos que hay que seguir en orden para un funcionamiento óptimo de la cámara de niebla:

1. Como paso opcional, en caso de querer usar el medidor de temperatura hay que asegurarse del correcto funcionamiento de los sensores conectando la placa a un ordenador para asegurarse de que el programa de **Arduino** se ejecuta correctamente, el LCD se ve bien, los datos se almacenan sin errores y el programa que los grafica no tiene errores. Para hacer estas comprobaciones se recomienda calentar con el dedo los termistores de uno en uno para asegurarse de que la temperatura medida por él sube. En caso de no ser así habrá que revisar que no haya errores de nomenclatura de variables en el programa y, si ya ha funcionado bien el programa antes, asegurarse de que ningún cable se ha desconectado.
2. Antes de empezar con la preparación conviene tener a mano todo lo necesario: cámara de niebla, fuente radiactiva (si desea usarse), guantes térmicos, espátula de plástico para picar hielo seco, linterna (mejor si es plana de leds), alcohol de isopropil, una jeringa, una caja de corcho blanco, recipiente no muy alto cuya base sea mayor que la cámara de niebla para echar el hielo seco, fuente radiactiva, *blutack*, servilletas, bolsa de basura negra, hielo seco (lo mejor es tenerlo pedido pero no ir a por él hasta que no esté todo preparado para evitar que se derrita).
3. Con ayuda de una servilla mojada en agua limpiar las paredes de la cámara por dentro y por fuera para evitar que marcas de dedos y polvo dificulten la observación. Secar usando otra servilleta, un trapo o papel de periódico para que no se queden marcas de gotas.

4. Hacer 4 churros de plastilina cuya longitud sea igual a los laterales de la cámara y realizarles un corte longitudinal con ayuda de la espátula que llegue un poco más allá del centro.
5. Con un poco de *blutack* pegar la fuente radiactiva en su soporte.
6. Cogiendo la cámara con unos guantes de latex o en su defecto con las manos pero por las esquinas y con servilletas colocar la pecera sobre la placa metálica (ensamblar la cámara). Hay que tener cuidado para que la compuerta entre en la guía.
7. Con ayuda de otra persona o apoyando la cámara sobre algo cuya base sea menor que la de la placa “morder” con los churros de plastilina los bordes de la pecera y la placa para que queden juntos y sellar así la cámara. Si fuese necesario añadir plastilina. Es fundamental no tocar la cámara despues de haber usado la plastilina ya que se mancharía mucho. Estos dos pasos anteriores podrían ahorrarse si se sellase la cámara de forma definitiva usando silicona.
8. Ir a por el hielo seco y transportarlo usando la caja de corcho blanco ya que este es un buen aislante. Con 800 gramos de hielo seco puede realizarse una sesión continua de dos horas de duración.
9. Poner la bolsa de basura sobre el recipiente del hielo seco, en este TFG se ha usado la propia tapadera de la caja de corcho blanco. La bolsa de basura sirve para tener un fondo negro fuera de la cámara en lugar del blanco que da el corcho. Usando los guantes térmicos coger el hielo seco, ponerlo sobre la bolsa de basura y picarlo con ayuda de la espátula. Su radio no debe superar al de una moneda de un euro ya que de lo contrario su superficie no sera suficiente para enfriar considerablemente la cámara y no se verá niebla.
10. Conectar **Arduino** a un ordenador y ejecutar los programas de almacenamiento de datos y creación de gráficas.
11. Con ayuda de guantes o servilletas colocar la cámara de niebla sobre el hielo seco. Mientras el aire en el interior de la cámara se va enfriando echar isopropil por los tubos lentamente para dar tiempo al fieltro a absorberlo, cada bayeta puede absorber 30 ml de isopropil sin gotear, echando el máximo en cada bastidor serían 60 ml en total lo cual crea una niebla demasiado espesa. Es suficiente echar 20 ml en cada bastidor o 30 en sólo uno de ellos.
12. Apagar la luz de la habitación, iluminar la cámara usando la linterna por una de las paredes de menor tamaño y mirar por la de mayor tamaño, el ángulo óptimo de observación son 135°C . Se recomienda mirar una región de la cámara de niebla cerca al suelo. Es preferible no respirar por la boca muy cerca de la cámara de niebla o si se hiciera, ponerse la mano delante para no empañarla.
13. Transcurridos entre 5 y 15 minutos, dependiendo de la cantidad y tamaño del hielo seco, empezará a ser posible verse la niebla caer, a partir de este momento ya pueden observarse trazas. Cerca de la fuente será el primer sitio donde se observen si esta tiene una alta actividad. Las principales causas de error son: temperatura insuficientemente baja, cantidad de alcohol incorrecto y mal sellado así que si pasado este tiempo no se ve nada comprobar la temperatura en el interior, el punto más bajo debe rondar los 0°C al menos para ver algunas trazas (lo óptimo son -25°C pero a partir de -10°C pueden verse bien), si la temperatura no baja suficientemente rápido o directamente no baja, picar más el hielo seco e incluso echar más. Si aún así no se ve niebla o si la temperatura ya era suficientemente baja echar poco a poco más isopropil. Hay que tener cuidado de no echar demasiado alcohol ya que de lo contrario la niebla podría volverse demasiado espesa para ver partículas con facilidad. Si aun así sigue sin verse nada debe abrirse la cámara, secarse la placa de aluminio ya que estará empapada por el isopropil, y volver a repetir todo desde el paso 4 asegurandose de que la cámara se sella lo mejor posible y la cantidad de alcohol es adecuada.
14. Tras una hora y media la cantidad de niebla empezará a disminuir, si se quiere prolongar la observación añadir más hielo o más alcohol en función desi la temperatura es buena o no.

7. Resultados

En este apartado se describen las experiencias durante la prueba final de la cámara de niebla. La forma de proceder está descrita en el apartado anterior. Las características diferenciables de las trazas dejadas en la cámara por los diferentes tipos de partículas ionizantes que la atraviesan fueron descritos en la sección 4.3.

En la figura 20 se muestra el gráfico de temperaturas medidas por los termistores durante la observación.

Hay una región de temperatura constante en la que la cámara aun no estaba colocada sobre el hielo seco, durante este tiempo se le estuvo echando isopropil en el fieltro. Una vez la cámara se puso sobre el hielo seco la temperatura cayó bruscamente hasta alcanzar un mínimo a los 20 minutos, esta temperatura mínima duró tan sólo 5 minutos tras los cuales volvió a aumentar gradualmente.

También puede verse que hay una ligera diferencia de temperatura entre los dos termistores inferiores a pesar de estar ambos tocando la placa metálica, esto puede deberse al hecho de que la forma y composición de ambos termistores es distinta por lo que en contacto directo con una fuente fría un tarda más en enfriarse que el otro. Es poco probable que se deba a un error de calibrado ya que a temperatura ambiente el valor que arrojaban ambos es practicamente el mismo.

Comparando los dos termistores digitales (separados 0.6 cm entre sí) puede verse que se hay un gran gradiente de temperatura llegando a aproximadamente $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ en el minuto 20. Este gradiente cae bruscamente ya que comprando el termistor digital superior con el analógico también superior se ve que se llega a un gradiente de aproximadamente $6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Y entre el termistor superior a 1.6 cm de la base y los bastidores a temperatura ambiente (unos 24°C) colocados a 19 cm del fondo hay un gradiente de $1.23^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

Cabe destacar que a pesar de que el aluminio es un buen aislante y la placa usada era bastante delgada la temperatura de esta sólo bajó hasta los -14°C mientras el hielo seco está a -80°C .

A pesar de que la temperatura no baja demasiado y no se mantiene en el mínimo demasiado tiempo pudieron verse trazas durante casi toda la observación, de hecho empezó a verse niebla cuando la parte inferior alcanzó una temperatura de 6°C y pudieron verse trazas mientras esta se mantuvo por debajo de 0°C , momento en el cuál la niebla fué lo suficientemente densa como para ver claramente las trazas pero no tanto como para dificultar su visibilidad.

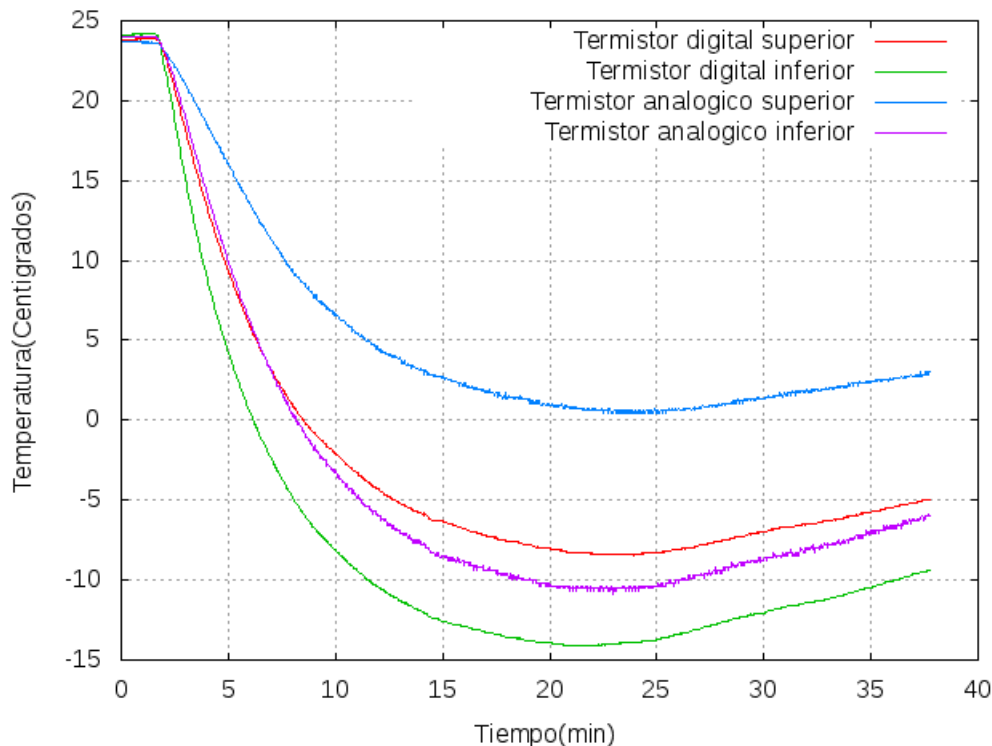


Figura 20: Gráfica de la temperatura medida por los cuatro termistores en función del tiempo durante una de las pruebas realizadas con la cámara de niebla.

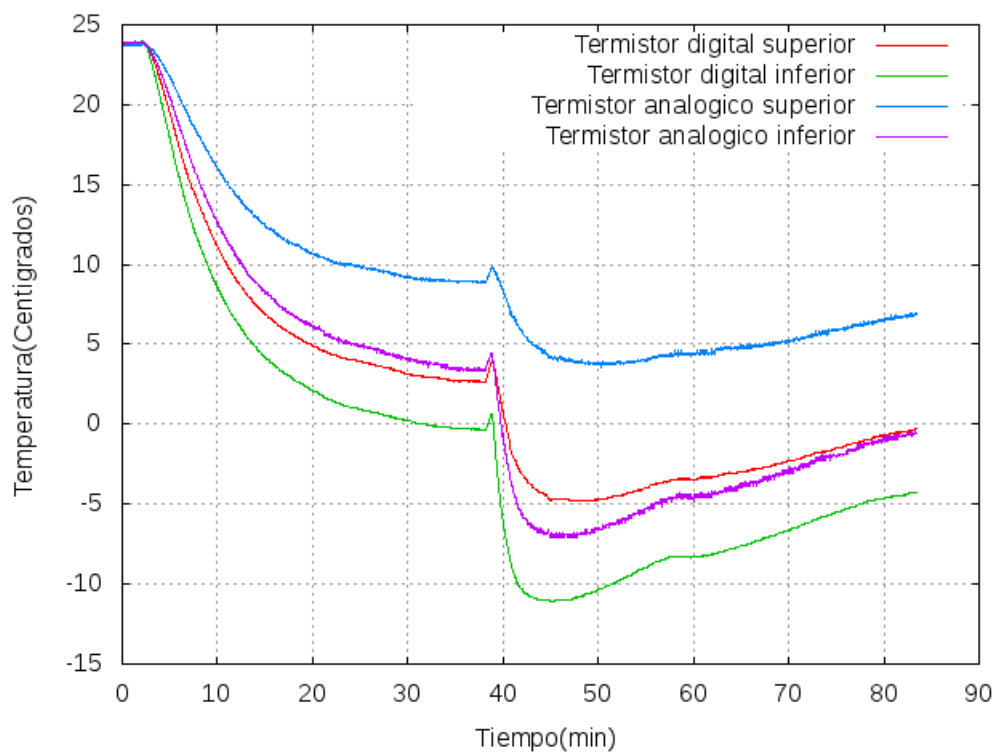


Figura 21: Gráfica de la temperatura medida por los cuatro termistores en función del tiempo durante una de las pruebas realizadas con la cámara de niebla.

En la figura 21 se muestra el resultado de la evolución temporal de la temperatura en el interior de la cámara en otra de las pruebas realizadas. Como puede verse en la gráfica la temperatura no descendió lo suficiente, de hecho, apenas se veía una tenue niebla y ninguna traza. Tras esperar un tiempo se retiró la cámara del hielo seco, cosa que hizo aumentar la temperatura, se picó mejor y se volvió a poner la cámara sobre él, en seguida la temperatura descendió rápidamente. Esto fue debido a que los trozos de hielo eran demasiado grandes, al picarlos se aumentó la superficie en contacto con la cámara y permitió que esta se enfriara lo suficiente para ver trazas claramente. El final de la observación fue producido por un descenso en la densidad de la niebla pero así y todo aún podían verse trazas sin demasiada dificultad.

En la figura 22 se muestran fotografías del estado de lo que debe verse en la cámara cuando la temperatura es óptima (izquierda) e insuficiente (derecha).

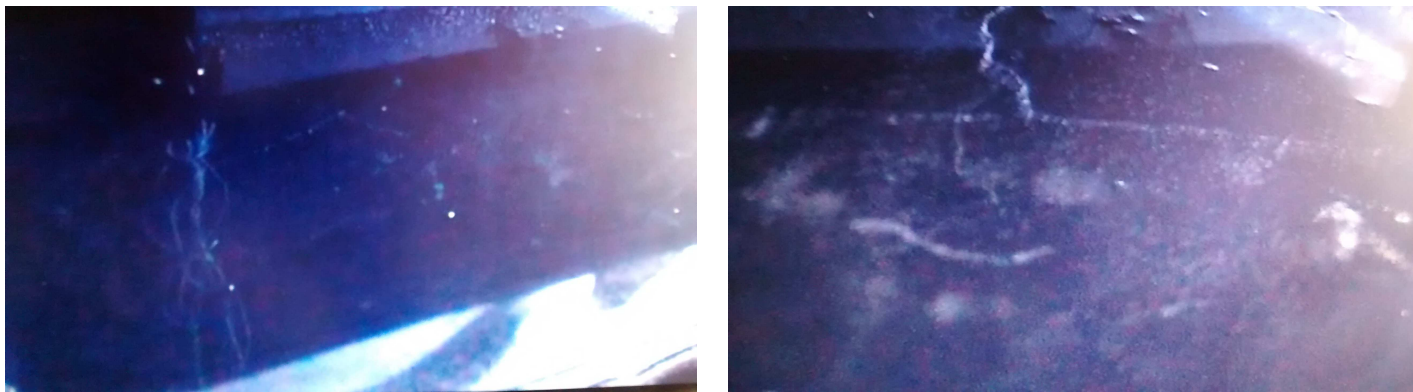


Figura 22: Estado de la cámara con temperatura óptima (izquierda) y demasiado alta (derecha).

Las fotografías mostradas en la figura 23 corresponden a partículas alpha procedentes de la fuente radiactiva de Americio-241. La curvatura que se observa en las trazas no es debida a un campo magnético sino a que el alcohol se escapa por los bordes de la cámara. Este efecto es más apreciable cuanto más cerca del borde se forman las trazas

y cuanto más largas son, esto se nota especialmente en trazas de muones. También se produce curvatura para trazas lejos del borde si la cámara está inclinada. Puede verse que, como se dijo, las partículas alfa tienen una traza corta pero muy luminosa.

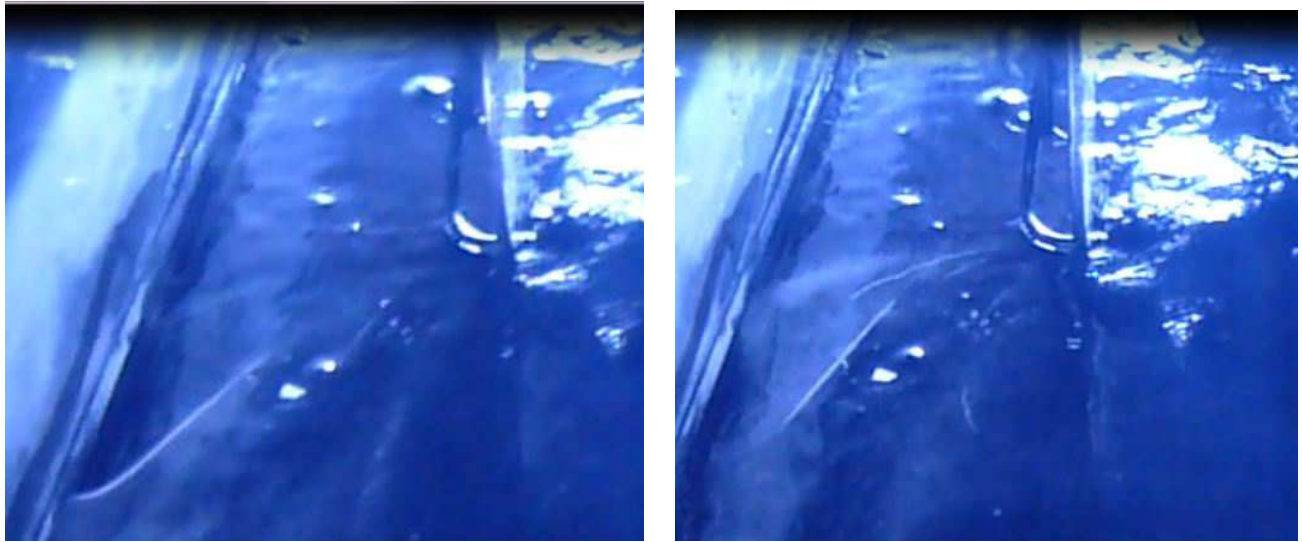


Figura 23: Partículas alfa procedentes de la fuente de Americio-241.

La figura 24 muestra una fotografía de una traza larga y gruesa correspondiente, probablemente, a una partícula alfa procedente de radiactividad ambiental (ver sección 4.3).



Figura 24: Partícula alfa procedente de radiactividad ambiental.

La figura 25 (izquierda) muestra una traza fina y larga, atravesando toda la cámara, generada por un muón cósmico. Es similar a la que dejaría un electrón, pero con apenas desviaciones respecto a la trayectoria recta al sufrir menos *scattering* por su mayor masa. cuya traza es fina y larga como la de un electrón pero apenas se desvía debido a que su masa es mayor que la del electrón. En un instante posterior (figura 25 derecha) se puede observar una traza similar a la que se produciría tras la desintegración de un muón en un electrón (y neutrinos invisibles). Este tipo de sucesos

es muy poco frecuente y se caracteriza por tener forma de L y porque una rama (la asociada al muón) es ligeramente más intensa que la otra, ya que el electrón tendrá menor momento que el muón y además su masa es menor.



Figura 25: Izquierda: Muón cósmico atravesando la cámara. Derecha: Traza similar a la desintegración de un muón.

También pudo apreciarse una traza debido a un electrón (figura 26 izquierda) caracterizada por ser fina, larga y errática debido al *scattering* múltiple que sufre. Por último, la foto de la izquierda en la figura 26 muestra un suceso tipo V generada, bien por la desintegración de fotón en un electrón y un positrón, bien por la coincidencia de dos muones que entraron simultáneamente en la cámara con ese ángulo. Este es un proceso poco probable pero la cantidad de muones es elevada, al igual que el tiempo de observación. No es posible discernir con seguridad entre estos dos procesos sin un campo magnético que curvase las trayectorias y conocer así la carga de las partículas.



Figura 26: Izquierda: Traza de un electrón. Derecha: Conversión de un fotón en un par e^+e^- .

8. Conclusiones

Las aportaciones más importantes de este Trabajo Fin de Grado han sido las siguientes:

1. La construcción de una cámara de niebla de difusión y la implementación de dispositivos que facilitan la observación y permiten un mayor control sobre las condiciones en el interior de la cámara (sección 5).
2. Elaboración de eficientes programas tanto de **Arduino** como de **ROOT** que permiten monitorizar en tiempo real las condiciones en el interior de la cámara (apéndices D y E). Los dispositivos de temperatura también fueron calibrados en este trabajo (apéndice C).
3. Elaboración de un programa que implementa la fórmula de Bethe–Bloch para las diversas partículas estudiadas calculando su energía perdida en el aire así como la distancia recorrida en este medio (sección 4).
4. Análisis de prototipos que han permitido conocer las limitaciones de la cámara de niebla y de sus dispositivos así como solventar algunos de ellos y proponer mejoras para detectores futuros (apéndice A).
5. Visualización de trazas dejadas por partículas elementales de diferentes características cuya correcta identificación ha sido posible gracias al óptimo funcionamiento de la cámara y al aprendizaje llevado a cabo durante el estudio de la bibliografía, así como al análisis de los datos obtenidos del programa de Bethe–Bloch (sección 7).
6. Implementación de mejoras respecto a cámaras convencionales y propuestas de mejoras para diseños futuros (apéndice B).

Como material adicional se ha elaborado un vídeo en el cuál se explican se manera breve los conceptos básicos necesarios y los pasos a seguir para la construcción de una cámara de niebla. Este video puede verse en el siguiente enlace:

<http://camara-de-niebla.blogspot.com.es/2014/06/contruccion-de-una-camara-de-niebla-de.html>

Referencias

- [1] Techniques for Nuclear and Particle Physics experiment: A how to approach, W.R.Leo, Second Edition, Springer-Verlag
- [2] Muon Stopping Power and Range, D.E. Groom, N.V.Mokhov, S.Striganov
- [3] Particle data group:31.Passage of particle through matter, H.Bichsel, D.E Groom, S.R.Klein.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_chamber.
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>
- [6] <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>
- [7] <http://www.electronicaembajadores.com/datos/pdf1/ss/sste/sstentcxxx.pdf>
- [8] <http://www.i-cpan.es/concurso/ganadores/55CamaraNiebla.pdf>
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_chamber
- [10] <http://www.scienceinschool.org/2010/issue14/cloud>
- [11] <http://www.amnh.org/education/resources/rfl/web/einsteinguide/activities/cloud.html>
- [12] <http://www.lns.cornell.edu/~adf4/cloud.html>
- [13] <http://root.cern.ch/drupal/>
- [14] <http://www.arduino.cc/>
- [15] <http://www.electronicaembajadores.com/datos/pdf1/lc/lcal/lcal005.pdf>
- [16] <http://camara-de-niebla.blogspot.com.es/2014/06/contruccion-de-una-camara-de-niebla-de.html>

Apéndices

A. PROTOTIPOS

A continuación se describen las experiencias realizadas con el objetivo de realizar una prueba de primeros principios de la cámara de niebla de difusión así como discernir el mejor método de construcción. Se realizaron 4 prototipos tomando como base distintos recipientes: una *placa Petri*, un bote de cristal, un vaso de plástico de *cuba-litro* y una pecera de plástico.

A.1. Materiales, Montaje y Resultados

En la tabla 2 se muestran los materiales necesarios para ensamblar cada uno de los prototipos.

	Placa Petri	Tarro de cristal	Vaso de cuba-litro	Pecera
Placa Petri	x			
Tarro de cristal		x		
Vaso de cuba-litro			x	
Pecera				x
Lámina de aluminio			x	x
Fieltro, Pegamento y Tijeras	x	x	x	x
Plastilina negra			x	x
Goma eva negra	x	x		
Cinta adhesiva negra	x	x	x	x
Muestra radiactiva			x	x
Isopropileno	x	x	x	x
Linterna LED y cámara	x	x	x	x
Guantes	x	x	x	x
Hielo seco y contenedor	x	x	x	x

Cuadro 2: Materiale necesario para la realización de cada prototipo.

Los tres primeros se realizaron se forma simultanea debido a que su tamaño permitió ponerlos en la misma placa. Lo primero que se hizo fué cubrir un lado de la placa de aluminio con cinta aislante negra para facilitar la visualización de trazas. En las secciones siguientes se describe el proceso que se siguió para construir cada uno de los prototipos, así como los resultados de la experiencia. Para las pruebas se trituroó medio kilo de hielo seco y se depositó en un trozo de corcho blanco plano y sobre él se puso una placa de aluminio recubierta en su cara superior con cinta adhesiva negra. Sobre esta se colocaron el tarro de cristal, el vaso de cuba-litro y la placa Petri (figura 27).



Figura 27: Detalle de los tres primeros prototipos durante las pruebas (de izquierda a derecha: tarro de cristal, placa Petri y vaso cuba-litro) colocados sobre la placa de aluminio y el hielo seco.

A.2. Placa Petri

1. Se cortó un disco de goma eva negra del tamaño de la placa Petri y se colocó en la parte superior (Se usó la placa Petri al revés para evitar que la lupa dificulte la visualización de trazas). Se cortó un trozo de fieltro cuyo grosor fue un tercio de la altura de la placa Petri y su longitud fue el perímetro. Se pegó el trozo de fieltro al interior de la placa Petri con el pegamento. Se empapó el fieltro con isopropileno y se cerró. Se cortó un trozo de cinta adhesiva y pegarlo en la unión de la placa Petri para asegurar la hermeticidad.
2. No se observó niebla y, por lo tanto, tampoco trazas durante toda la experiencia. Tras 15 minutos sobre la placa se empañó la parte superior imposibilitando la observación.

A.3. Tarro de cristal

1. Se cortó un disco de goma eva negra del tamaño de la tapa del tarro y se colocó en ella. Se cortó un trozo de fieltro cuya longitud sea del perímetro del bote de cristal. Se pegó el trozo de fieltro en el interior del bote con el pegamento. Se empapó el fieltro con isopropileno y se cerró.
2. 5 minutos después de iniciar el experimento se observó que la goma eva está empapada debido a que el agua que hay en el aire se había condensado. También pudo observarse como caía niebla si se ilumina con una linterna LED lateralmente.
3. 10 minutos: la cantidad de niebla que se observa se ha reducido considerablemente hasta casi su desaparición. La tapa está recubierta de hielo.
4. 33 minutos: se retiró el tarro de cristal ya que no hay niebla. Para mejorar la conducción térmica se sustituyó la goma eva de la tapa por cinta aislante negra y se añadió un poco más de fieltro en la base. Tras volver a echar alcohol se volvió a poner el tarro en la placa metálica.
5. 50 minutos: no se observaron niebla ni trazas a pesar de intentarse calentar el fieltro con una lámpara halógena.

A.4. Vaso de cuba-litro

1. Se cortó un trozo de fieltro cuya longitud fue el perímetro del vaso. Se pegó el trozo de fieltro en el interior del vaso con el pegamento. Se hizo un cilindro de plastilina cuya longitud fue del diámetro del vaso. Se puso la plastilina en el borde del vaso. Se empapó el fieltro con isopropileno. Se cubrió una cara de la lámina de aluminio con cinta adhesiva negra. Se puso el vaso con la plastilina en la placa y se presionó para que la plastilina uniera el vaso y la lámina. Se añadió y moldeó la plastilina para que no hubiese grietas.
2. 2 minutos después de iniciar el experimento aparecieron gotas de agua en la placa de aluminio bajo el vaso.
3. 15 minutos: se vio una tenue "nieve" que cae y se detectó la primera traza.
4. 42 minutos: se despegó el fieltro de la parte superior debido al alcohol y se tuvo que finalizar el experimento. Desde que se observó la primera traza hasta este punto se observaron una gran cantidad de trazas.

A.5. Pecera

1. Se cortaron cuatro trozos de fieltro cuya longitud correspondía a la longitud y anchura de la pecera. Se pegaron los trozos de fieltro en las paredes de la pecera, cerca de la base. Se hicieron 8 cilindros de plastilina cuya longitud correspondía a la longitud y anchura de la pecera. Cuatro de ellos se pegaron a los bordes de la pecera y los otros cuatro a la placa. Se empapó el fieltro de la pecera con isopropil. Se colocó la pecera sobre la placa metálica haciendo coincidir la plastilina y se amasó un poco para sellar bien la cámara.
2. Se usó la pecera con una muestra radiactiva emisora alpha de Americio-241. Se trituró 1 kg de hielo seco sobre el trozo de corcho blanco anterior pero esta vez se puso una bolsa de plástico negro entre el hielo y el corcho para mejorar la visualización. Se colocó la cámara sobre el hielo seco tal y como muestra la figura 28.

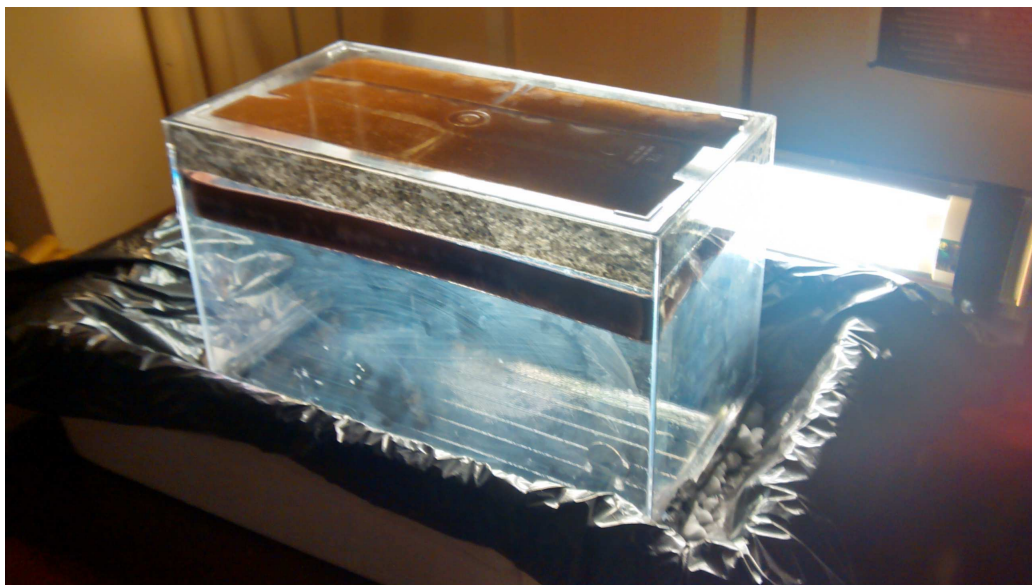


Figura 28: Montaje experimental del primer prototipo empleando la pecera.

- 1 minuto después del inicio del experimento se empapó el fondo.
- 9 minutos: pudo apreciarse la niebla.
- 29 minutos: dejó de verse la niebla de modo que se abortó el experimento.

Se abrió la cámara y se colocó una segunda tira de 1 cm de grosor rodeando la pared y algunas tiras más en la base de la pecera cubriéndola casi por completo. Se secó la placa metálica, se preparó la plastilina, se empapó todo el fieltro con isopropil, se cerró la cámara y se colocó sobre el hielo seco.

- 1 minuto después del inicio del experimento pudo verse claramente la niebla.
- 2 minutos: se observaron muchas trazas de partículas emitidas por la fuente.
- 5 minutos: se observaron las primeras trazas de partículas de rayos cósmicos.
- 1 hora y 25 minutos después: la niebla era mucho menos densa y la nitidez de las trazas había descendido hasta el punto de hacerlas muy difíciles de ver.

A.6. Conclusiones

A continuación se enumeran las conclusiones a las que se ha llegado tras las experiencias anteriormente descritas:

- Se descarta usar una placa Petri como cámara de niebla ya que dado su poca altura es demasiado difícil establecer un gradiente de temperatura correcto. También es difícil su observación.
- Para una cámara de niebla del tamaño de esta experiencia es suficiente con 800 gramos de hielo seco para una sesión de unas 4 horas (en invierno), tras este tiempo aún queda hielo pero empieza a ser demasiado poco.
- La cámara de niebla construida a base de una pecera tiene un periodo de actividad máximo de una hora y media aproximadamente, tras ese tiempo se ha consumido casi todo el isopropil y no queda suficiente como para crear la densidad de niebla necesaria para observar trazas.
- Es importante añadir el isopropil en último lugar, si no se evaporará y al poner a funcionar la cámara habrá poco alcohol lo que se traducirá en poca niebla. Si no puede echarse el alcohol en último lugar hay que intentar al menos poner el recipiente boca abajo para que no se evapore tan rápido.
- Para mejorar la observación y la duración es conveniente poner fieltro no sólo en la pared de la cámara sino también en el techo.

- Debe usarse cianocrilato (superglue) para pegar el fieltro a la base ya que el alcohol disuelve el pegamento del fieltro y la cinta adhesiva.
- Debe humedecerse el fieltro abundantemente con alcohol pero sin que llegue a gotear, de lo contrario la niebla será tan espesa que será difícil ver las trazas (figura 29 derecha).
- La base sobre la cual se vierte el hielo seco debe ser plana para que no dificulte la observación y preferentemente debe ponerse entre ella y el hielo seco algo negro como una bolsa de basura para no tener molestos reflejos.
- La iluminación óptima se consigue con una lámpara de LED y con un ángulo de unos 120°.
- El volumen efectivo de detección en las cámaras anteriormente descritas fué de tan sólo 2 cm de altura por la superficie de la cámara y se situaba cerca del hielo seco. Por lo tanto, cuanto más superficie tenga la cámara mejor siempre y una buena altura es de unos 15 cm.
- La plastilina es una forma de unir y sellar la cámara barata y reversible, no obstante es bastante laborioso conseguir un buen sellado, sobre todo si usamos plásticos flexibles como el de un vaso de cuba-litro. El sellado debe ser bueno antes de colocar la cámara sobre el hielo seco ya que al enfriarse la plastilina se endurece pudiendo llegar a desprenderse si no está bien pegada y una vez fría no se puede añadir nueva plastilina (no se pega a la fría). La mejor forma es poner plastilina tanto en los bordes del recipiente usado como en la placa metálica y luego presionar y moldear para cerrar todos los huecos, por último, y solo si fuese necesario, añadir plastilina en zonas que no estén bien unidas.
- Se recomienda respirar por la nariz al estar cerca de la cámara, exhalar por la boca puede empañar la pared imposibilitando la observación.
- Este tipo de cámara no requiere un sellado perfecto. Puede realizarse una buena observación incluso si hay fisuras siempre y cuando estas no sean muy grandes.

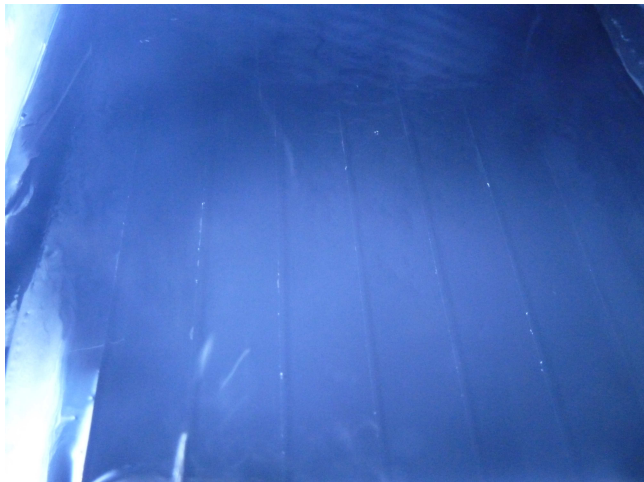


Figura 29: Izquierda: Observación de las primeras trazas con prototipo basado en pecera. Derecha: Exceso de niebla en la cámara.

B. MEJORA DE ALCOHOL PERMANENTE

Se ha demostrado experimentalmente que la cámara de niebla funciona bastante bien y durante un largo periodo de tiempo. No obstante, se trata de un tiempo finito debido a que tanto el hielo seco como el alcohol se agotan. Es fácil reponer el hielo seco, basta con picar más y colocarlo bajo la cámara. La reposición de alcohol es, sin embargo, más complicada. Este ejercicio requiere interrumpir la observación, ya que hay que abrir la cámara para acceder al depósito de alcohol, volver a cerrarla y empezar de nuevo.

Con el doble objetivo de prolongar el tiempo de observación de la cámara de forma indefinida y posibilitar un sellado permanente y, por lo tanto, más efectivo, se proponen a continuación una serie de experimentos cuya finalidad es diseñar un método eficiente de reposición continua de alcohol.

B.1. Material

Como los materiales que se usaron en los distintos experimentos tienen muchos puntos comunes, se representa en la tabla 3 marcados los que se necesitan en cada prueba.

	Prueba básica	Bastidor
Tubo de silicona	x	x
Agujas	x	x
Plastilina	x	
Bayeta		x
Filtro		x
Mechero	x	x
Agua	x	
Isopropil		x
Pecera		x
Pegamento		x
Jeringa y Tijeras	x	x
Puntillas		x
Taladro		x

Cuadro 3: Material necesario para la mejora del alcohol permanente.

B.2. Primera prueba

En esta prueba se usó para confirmar que el fundamento en el que se basaban diseños posteriores era válido, por lo tanto, aunque simple esta prueba resultó de vital importancia (figura 30 izquierda).

1. Se cortó un trozo de tubo de silicona de unos pocos centímetros
2. Con ayuda de las agujas se perforaron agujeros a lo largo del tubo.
3. Se tapó un extremo del tubo con plastilina y se puso sobre un trozo de papel.
4. Con ayuda de la jeringa se echó agua dentro del tubo y se observó el resultado.
5. Se repitió el paso anterior colocando el tubo en diferentes posiciones con objeto de determinar si influye el hecho de que el tubo este curvado o no en la cantidad de líquido que derrama.
6. Se repitió desde el paso 2 ensanchando los agujeros para comprobar cómo cambiaba el comportamiento.
7. Se colocó un trozo de bayeta (filtro) en el bastidor de forma que estuviese tirante pero no demasiado para que la parte más baja fuese la central y se recortó la bayeta sobrante.
8. Se cortó un trozo de tubo de silicona cuya longitud era 8 cm superior al perímetro interno del bastidor y se perforó usando un alfiler calentado con un mechero dejando 4 cm a cada lado sin perforar.
9. Se pegó la parte perforada del tubo al bastidor con los agujeros en contacto con la bayeta usando cianocrilato (figura 30 derecha).

10. Se hicieron dos agujeros en el techo de la cámara usando un taladro para sacara los tubos de silicona.



Figura 30: Izquierda: Tubo de silicona usado para la prueba sencilla. Derecha: Tubo adherido al bastidor.

11. Para fijar el bastidor al techo de la cámara no se pudo pegar directamente ya que el fieltro creaba una superficie irregular así que se usó un metodo alternativo:

- a) Se pegaron 4 puntillas a los bordes del bastidor con las cabezas apuntando hacia arriba y todas a la misma altura.
- b) Se echó una gota de pegamento en la cabeza de cada puntilla y se pegó dentro de la cámara pasando previamente los tubos por los agujeros (figura 31 izquierda).



Figura 31: Izquierda: Bastidor pegado a la cámara y humedecido parcialmente. Derecha: Bastidor desde el interior de la cámara totalmente humedecido.

B.3. Segunda prueba

1. En primer lugar se probó con los agujeros realizados con un alfiler pequeño pero estos eran demasiado pequeños para que el agua saliese por ellos de modo que se descartó.
2. A continuación se engrosaron unos pocos agujeros en la parte central y final. Con este grosor el agua salía abundantemente cuando el tubo estaba en contacto con el papel y salía muy poco a poco cuando este se levantaba.
3. Finalmente se engrosaron los agujeros calentando previamente el alfiler con un mechero. En este caso el agua salía abundantemente tanto cuando el tubo estaba en contacto con el papel como cuando se levantaba.
4. Con el montaje realizado de esta forma se procede a introducir alcohol por los tubos. Se fue añadiendo el alcohol en pasos sucesivos de 5 ml. La foto de la izquierda en la figura 31 muestra la bayeta parcialmente humedecida, tras haberle añadido 17 ml de alcohol. Tras 34 ml de alcohol la bayeta dejó caer dos gotas de alcohol, por lo que se puede decir que este es el límite de este sistema. A continuación se puso la pecera de lado para fotografiar el

bastidor desde dentro (figura 31 derecha). Se puede observar en la imagen que el alcohol queda uniformemente distribuido y que la bayeta está totalmente empapada.

B.4. Prueba final

La última prueba de este sistema consiste en comprobar que produce una niebla suficientemente buena para que puedan verse trazas. Para ello se colocó una bolsa de basura negra sobre la superficie de corcho blanco y sobre esta se echaron 700 gramos de hielo seco picado. Sobre esta se puso la cámara y se echó 39 ml (primero 17 ml y tras un minuto otros 12 ml) de alcohol lo que produjo que gotease bastante. Para que se empapase bien se inclinó un poco la cámara. A continuación se procede a su observación.

1. T0: Empieza el experimento.
2. 5 min: Se ven las primeras trazas.
3. 85 min: La densidad de niebla se reduce a la mitad pero siguen observandose trazas (figura 32).
4. 128 min: No se ve casi niebla así que se le echan 20 ml de alcohol.
5. 130 min: No aumenta la cantidad de niebla así que se echan 15 ml más de alcohol con lo que se empapa totalmente la bayeta pero sigue sin verse mucha niebla.
6. 137 min: Se añaden 500 gramos más de hielo seco y enseguida vuelve a verse mucha niebla y trazas (figura 33).



Figura 32: Ejemplos de trazas observadas durante la prueba final.



Figura 33: Izquierda: Tubo de silicona usado para la prueba sencilla. Derecha: Densidad de niebla tras renovar el alcohol.

B.5. Conclusiones

- A la hora de introducir alcohol es recomendable que la jeringa no tenga burbujas ya que estas producen zonas que no quedarán empapas.
- Aunque el tubo tenga los dos extremos libres el alcohol no se repartirá de forma más uniforme hasta que no se retire la jeringa.
- Puede retirarse el exceso de alcohol que hay en el tubo absorbiendo con la jeringa.
- El alcohol introducido por el tubo llegará hasta el último agujero de mayor tamaño por lo que es muy importante que todos los agujeros tengan el mismo grosor o, a lo sumo, dejar los mas gruesos al final.
- Para hacer agujeros con calor se recomienda hacerlo al aire libre y con mascarilla ya que la silicona quemada libera gases tóxicos, debe tenerse cuidado de no perforar las dos partes del tubo ya que con este método apenas hay que hacer fuerza para realizar el orificio y es facil pasarse. Es recomendable usar un mechero de cocina ya que con uno tradicional la piedra de caliente mucho y muy rápidamente pudiendo producir quemaduras.
- Las superficies absorbentes toman el alcohol del tubo más rapidamente que si estuviese en el aire por lo que es importante que toda la parte agujereada del tubo esté en contacto con el fieltro o algunas partes se mojarán más que otras.
- Para pegar las puntillas al bastidor se recomienda marcarlas para que todas queden a la misma altura y tener cuidado de que se coloquen rectas para que la superficie en contacto sea máxima. Para comprobar que se han pegado bien colocar el bastidor apoyado sobre las cabezas en la mesa, si no hay ninguna coja se ha pegado bien. Para eliminar la posibilidad de que el bastidor este “cojo” se recomienda colocar el bastidor sobre las cabezas de las puntillas cuando hay tres colocadas y pegar la cuarta así, de este método nunca podrá quedar cojo ya que se mide con el suelo (figura 34 izquierda).
- Los bordes de un bastidor no son planos por lo que la puntilla no puede pegarse a todo el borde, aun así el cianocrilato es suficientemente bueno para que la unión sea fiable.
- Para pegar el bastidor a la cámara se recomienda ponerse en el extremo de una mesa con la pecera boca abajo y solo apoyada la mitad opuesta a la que se va a colocar el bastidor. Tambien se recomienda la ayuda de alguien que sujete la cámara. Introducir el bastidor boca arriba arriba con una mano y con la otra pasar los tubos por los agujeros, la otra persona debe cogerlos para asegurarse de que no se salen, una vez hecho esto pegar las cabezas de las puntillas. Tambien debe tenerse cuidado de no tocar las cabezas de las puntillas con los bordes de la pecera o las manos ya que se quitaría el pegamento y no quedaría pegado por ese lado, así y todo si esto ocurre es posible echar una gota de pegamento a posteriori que si bien no fijará tan bien como si estuviese en la cabeza fijará la puntilla lo suficiente.
- Para pegar el bastidor es recomendable que el tornillo quede en una esquina de la pecera para no ocupar espacio útil.
- Es recomendable echar el alcohol poco a poco para darle tiempo a distribuirse por la bayeta y echar la mitad en un extremo del tubo y la otra mitad por el otro para que se distribuya de forma uniforme ya que cuanto más lejos nos vayamos del extremo por el que echamos alcohol menos llegará.
- Es recomendable no tensar demasiado la bayeta para que la parte central queda más baja por gravedad, de este modo bastará echar alcohol por lo bordes y la gravedad hará que llegue al centro. No conviene dejarla demasiado floja ya que podría conseguirse un efecto extremo, es decir, que la parte central esté tan baja que todo el alcohol vaya allí dejando los bordes casi secos y el centro goteando.
- Usando una bayeta y con un bastidor circular de 16 cm de diametro el sistema puede absorber 34 ml de alcohol si se le deja echa el alcohol lentamente.
- Si se inclina la cámara cuando la bayeta está mojada el alcohol irá al sitio menos elevado, esto puede usarse para ayudar al alcohol a llegar a todas las zonas de la bayeta pero debe hacerse con cuidado ya que si se manda demasiado alcohol a una zona empezará a gotear.
- Cuando la niebla de haga menos densa comprobar si se tiene suficiente hielo seco antes de echar más alcohol ya que de otra forma podríamos pasarnos de cantidad y acabaría goteando y con la placa muy enfrianda las gotas producen el efecto ilustrado en la fotografía de la derecha en la figura 34.



Figura 34: Izquierda: detalle del bastidor boca abajo con puntillas. Derecha: Gotas de alcohol al caer directamente sobre la placa de aluminio.

- Antes de empezar la preparación del experimento se aconseja limpiar la cámara por dentro y por fuera y luego evitar mancharla ya que las marcas de dedos son muy molestas.
- Con un bastidor en un lado es suficiente para que haya suficiente niebla en toda la cámara y observen trazas, no obstante, para mejorar su eficacia se añadirá un segundo bastidor en el otro extremo, de esta forma no será necesario echar tanto alcohol en el bastidor y se elimina el riesgo de goteo.

C. CONTROL DE TEMPERATURA

Ahora no sólo se tiene un método de añadir alcohol de forma continua, sino también una forma de medir la cantidad añadida (la jeringa) y conocer así la óptima. No obstante no se sabe nada acerca de la temperatura a la que está la placa de aluminio, ni del gradiente de temperatura. Para obtener información de esto podría usarse un termómetro pero sería demasiado aparatoso e impreciso así que se propone usar resistores los que mediremos su resistencia para calcular la temperatura.

C.1. Medida del gradiente de temperatura

Para hacerse una idea de la temperatura de la cámara a cada altura se practicó un pequeño agujero cerca de una de las paredes de la cámara y se introdujo una sonda medidora de temperatura lo más recta posible hasta el fondo. La cámara se enfrió usando hielo seco y cuando la temperatura se estabilizó se procedió a su medida de la siguiente forma:

1. Se tomó una primera medida de la temperatura en la placa de aluminio y se hizo una marca en la sonda a la altura del agujero.
2. A continuación se sacó un poco la sonda, se hizo otra marca en la sonda a la altura del agujero y se tomó el nuevo valor de la temperatura.
3. Se repitió el paso anterior hasta sacar la sonda por completo
4. Se midieron las distancias desde la primera marca de la sonda y se relacionaron con la temperatura. El resultado de la medida se muestra en la figura 35.

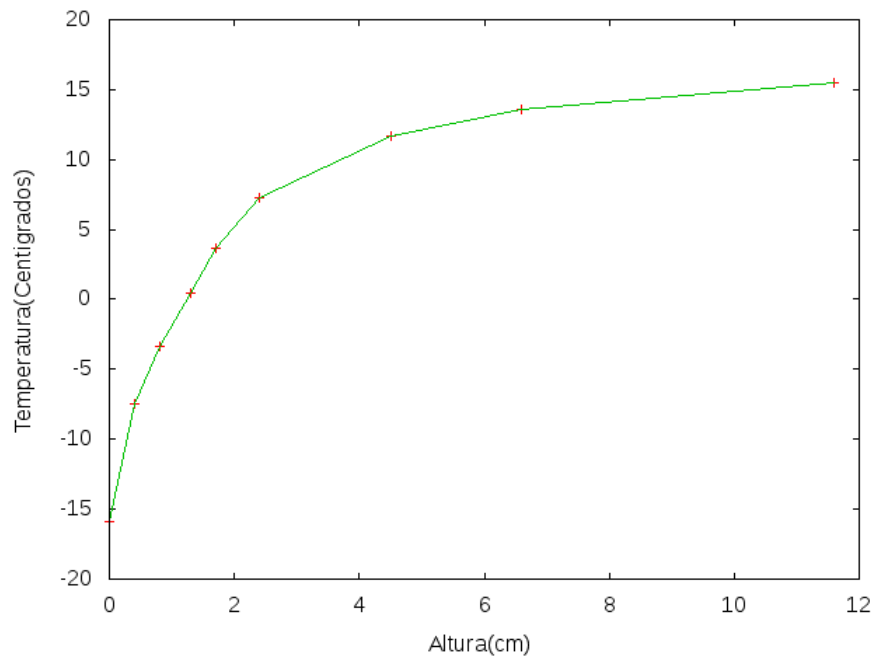


Figura 35: Variación de la temperatura en el interior de la cámara en función de la distancia a la base de aluminio.

C.2. Montaje y Calibrado

Para medir la temperatura se usaron dos PT10k, estos tienen la propiedad de que a 0°C su resistencia nominal es $R=10000\Omega$. En primer lugar se soldaron cables finos a las patas de los PT's usando un soldador de punta fina (aunque

hubiese sido mejor uno de punta plana). Para hacer más fácil la medida se conectaron esos cables a una clavija de 4 puntos de una fuente de alimentación. Con unos enganches de cocodrilo “mordiendo” dos de los puntos y los otros dos extremos conectados a un polímetro puede medirse la resistencia. Se hizo una medida a temperatura ambiente ($T=22.0^{\circ}\text{C}$) y se vió que la resistencia de los PT's era de $R=10.56\text{ k}\Omega$ por lo que se pudo suponer que todo era correcto.

Para que los PT's se mantuviesen a una altura fija se usó una guía contruida a partir de una banda metálica de un archivador con grapas por los que pasar los cables para que no se movieran. Los PT's se fijaron pegando el extremo del cable más cerca a una de las patas del PT a la guía y se colocaron en horizontal ya que como se ha visto el gradiente es muy grande cerca de la placa (figura 36).

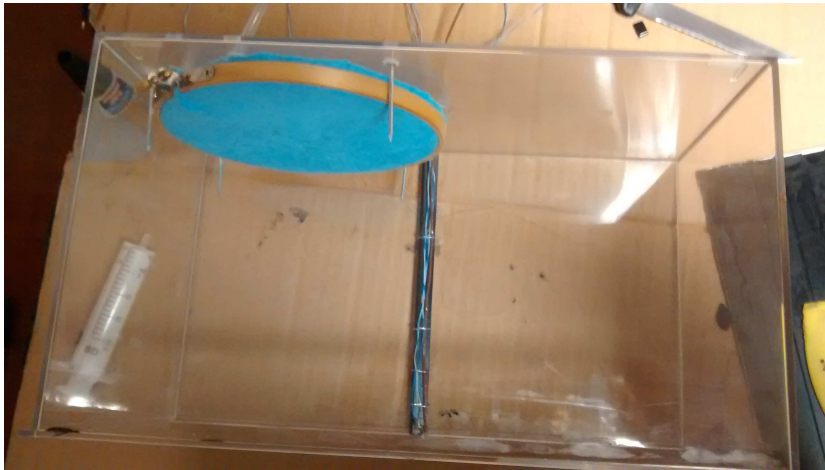


Figura 36: Sonda de temperatura y PT10k en el interior de la cámara.

A partir de este punto se conocerá como PT10k-A al termistor más cercano a la placa (el inferior) y PT10k-B al mas lejano (superior).

Hasta ahora, para sellar la cámara, se habia puesto plastilina en los bordes lo que hacía que hubiese una pequeña distancia entre la placa y la pecera. Al ponerse la guía fue necesario que los bordes de la pecera tocasen directamente la placa para que los PT's estuviesen cerca de la base, para conseguir esto se elaboró un método alternativo para sellar con plastilina:

- Se hicieron churros de plastilina cuya longitud fuese la de los bordes de la cámara y se hizo una muesca a largo de cada uno sin llegar hasta el final.
- Se puso la pecera sobre la placa y se usó la plastilina a modo de pinza para unir y sellar. Se moldeó para asegurarse de que todo queda fijo.

El fabricante ofrece una fórmula polinómica de tercer orden para calcular la temperatura en función de la resistencia de los PT's, sin embargo, se prefirió hacer un calibrado ya que de esta forma se tiene tambien en cuenta la resistencia debida al cable y al envejecimiento de los PT's. Para esto se dejó el sensor de temperatura en la guía pero en este caso no estaba fijo para poder sacarlo posteriormente.



Figura 37: Cámara sobre hielo seco y polímetros durante calibrado de PT10k.

Se usó un polímetro para medir la temperatura de la sonda y otro para la resistencia de los termistores. A continuación se muestra una tabla con los datos que se usaron para calibrar los PT's, se eligió el PT A durante el calentamiento de la cámara ya que este proceso es más gradual que el enfriamiento y pudieron tomarse mejor los datos:

PT10k-A ($\pm 0,01k\Omega$)	PT10k-B ($\pm 0,01k\Omega$)	Temperatura ($\pm 0,1^\circ \text{C}$)
8.80	9.65	-25.0
8.91	9.65	-23.8
8.91	9.68	-22.6
9.04	9.69	-21.2
9.09	9.71	-20.6
9.15	9.75	-19.1
9.20	9.78	-18.0
9.25	9.80	-17.0
9.29	9.81	-16.0
9.33	9.84	-15.0
9.37	9.86	-14.0
9.42	9.88	-13.0
9.46	9.90	-12.0
9.50	9.92	-11.0
9.54	9.95	-10.0
9.58	9.97	-8.0
9.61	9.98	-7.0
9.65	10.0	-6.0
9.70	10.4	-5.0
9.81	10.9	-3.0
9.91	10.17	0.0
10.0	10.22	1.8

Cuadro 4: Datos medidos en los dos PT10k analizados y temperatura de referencia.

Con estos datos se hizo un ajuste de segundo orden a la siguiente expresión:

$$T = a \times R^2 - b \times R + c$$

En la figura 38 se representa gráficamente la temperatura en función de la resistencia usando los datos de la tabla 4 y el resultado del ajuste a la función anterior (línea continua).

$$a = (4,7 \pm 1,1) \frac{^{\circ}C}{k\Omega^2} \quad b = (70 \pm 20) \frac{^{\circ}C}{k\Omega} \quad c = (180 \pm 90^{\circ}C)$$

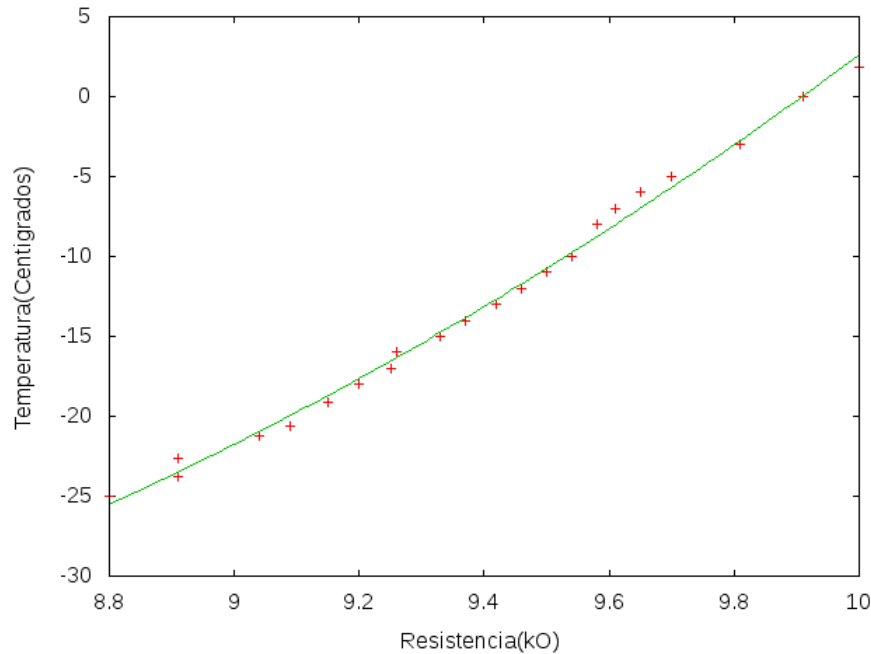


Figura 38: Gráfica de la temperatura en función de la resistencia del PT10k-A durante el calentamiento de la cámara.

Ahora que se conoce la zona de interés (la zona donde la temperatura es menor, aproximadamente 2 cm) y se tiene una fórmula para calcular la temperatura en función de la resistencia es posible ver cómo se comporta el gradiente de temperatura al enfriarse y calentarse.

La figura 39 muestra el gradiente de temperatura en función de la temperatura durante un periodo en el que la temperatura de la cámara aumenta. Para ello se usó como la diferencia de temperaturas las calculadas a partir de la fórmula anterior y los datos de la tabla en función de la temperatura inferior. Como la temperatura va aumentando puede interpretarse que el gradiente varía con el tiempo de izquierda a derecha.

La tabla 5 y la figura 40 muestran los datos obtenidos de las resistencias de los PT10k inferior y superior, así como el gradiente de temperatura calculado durante el proceso de enfriado de la cámara, tras colocarla sobre hielo seco. Al contrario que antes, como la temperatura se fue reduciendo, el primer dato observado fue el de la derecha y el último el de la izquierda (temporalmente va de derecha a izquierda).

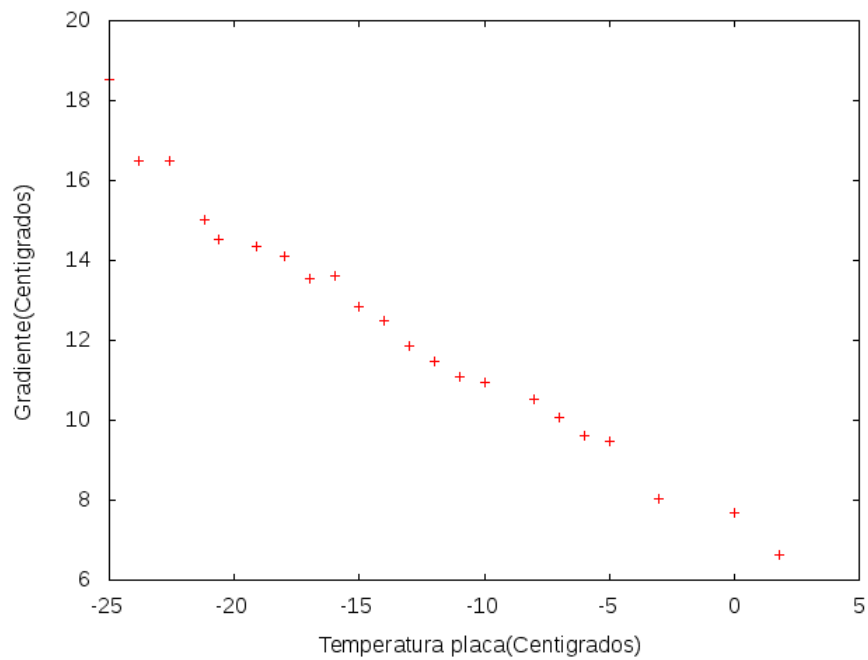


Figura 39: Gráfica del gradiente de temperatura en función de la temperatura inferior durante el proceso de calentamiento de la cámara.

PT10k-A ($\pm 0,01k\Omega$)	PT10k-B ($\pm 0,01k\Omega$)
10.45	10.52
9.74	10.22
9.56	10.19
9.48	10.16
9.41	10.12
9.34	10.10
9.28	10.7
9.22	10.03
9.17	10.00
9.12	9.96
9.07	9.93
9.02	9.89
9.00	9.86
8.96	9.83
8.95	9.80
8.99	9.74
9.06	9.72

Cuadro 5: Datos de la resistencia para los dos PT10k durante el enfriado de la cámara.

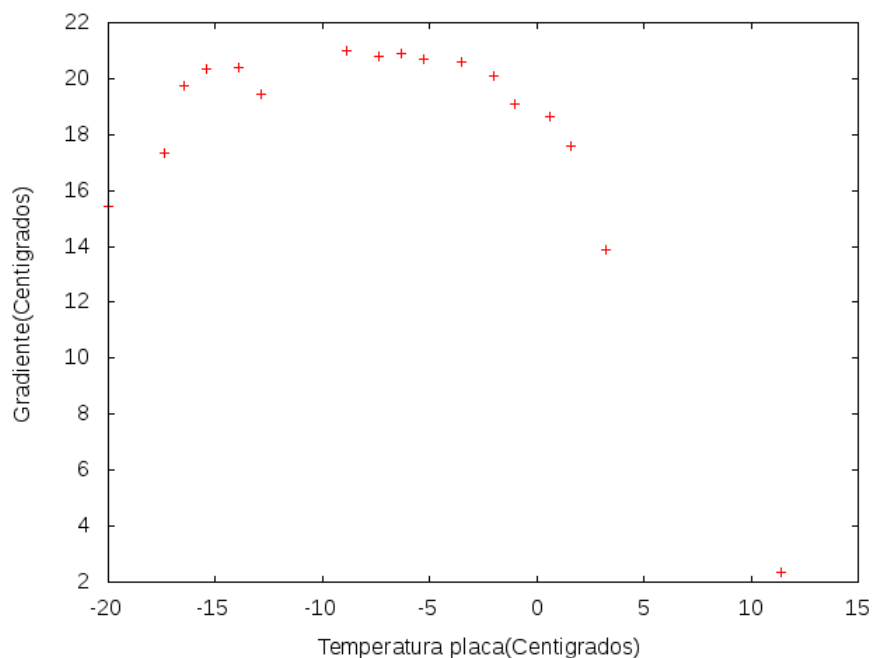


Figura 40: Gráfica del gradiente de temperatura en función de la temperatura inferior durante el proceso de enfriado de la cámara.

C.3. Conclusiones

- Para hacer marcas en la sonda se usó tippex echando primero un poco en un papel para que se humedeciese la punta. Esto hace que la marca sea fácilmente visible, no se puede quitar por accidente pero si cuando se quiere y no se necesita mucho esfuerzo para hacer la marca.
- Como uno de los polímetros no admitía enganches de cocodrilo se fijó la distancia entre las puntas para que fuese igual a la distancia entre los extremos de medición de los PT's con cinta adhesiva
- La temperatura varía rápidamente cerca de la placa pero tras separarse 2 cm de ella el gradiente pasa a ser muy pequeño.
- Sólo en la parte inferior de la cámara pueden observarse trazas porque es la única con una temperatura suficientemente baja para que el alcohol entre en fase supercondensada. La situación óptima sería que la parte en la que está el bastidor estuviese a temperatura ambiente para que este se evaporase y el resto de la cámara a -20°C aproximadamente para que el alcohol estuviese en fase supercondensada.
- El método alternativo para fijar la cámara con plastilina es más rápido, sencillo y fiable por lo que se recomienda usarlo siempre. El único inconveniente es que en el caso de usar placas de hielo seco el metal no estaría en contacto con el hielo así que esto sólo podrá usarse en caso de tener hielo seco picado.
- Para calibrar los PT's, si no fijamos la sonda a una altura fija con pegamento hay que tener mucho cuidado de que no se mueva ya que esto haría que la sonda y el PT no están a la misma altura.
- Durante el calentamiento de la cámara la parte inferior se calienta más rápido que la superior y esto se mantiene así hasta que ambas llegan a temperatura ambiente.
- Por otro lado, durante el enfriamiento la parte inferior empieza enfriándose más rápidamente que la superior por lo que el gradiente aumenta con el tiempo. Tras un tiempo el PT de arriba empieza a enfriarse debido a que el aire se va enfriando y el de abajo empieza a enfriarse más despacio, esto se ve en que el gradiente deja de crecer. Por último el PT de abajo deja de enfriarse mientras el superior sigue haciéndolo, lo que hace que el gradiente sea menor.

D. CODIGO DE INTERFACE MODULO Arduino

A continuación se expone el programa de Arduino que se elaboró para leer y procesar los datos de los termistores, una medida cada dos segundos, y a partir de ella calcular la temperatura. Dichos valores se muestran por una pantalla tipo LCD y son enviados a un ordenador via puerto COM para su procesamiento posterior con un programa ROOT (ver apéndice E).

```
/*
This Arduino program:
- Reads data from two Digital Thermistors
- Reads data from two NTC Thermistors
- Converts NTC Thermistors data to Celsius
- Displays the Temperature from Thermistors in a LCD display
- Writes the data from the 4 devices to the COM port
(the data is written into an external file using "gtkterm" for later display with a ROOT script)
- Light LEDs of different colours according to the temperature conditions of the chamber.
Author: Luismi (May 2014)
Read by an external code the temperature at two different heights of the a cloud chamber
using analog and digital thermistors. The data is showed using a LCD and also a COM port,
this port can be used to only present the data or to save the data in a file and make a plot on-live.
To make this we used an enhanced-terminal in linux named "gtkterm".
To get a fast information about the state of the chamber LEDs are used to report it:
RED->The chamber is too hot
GREEN->It is possible to observe some traces
BLUE-> The chamber is fully-operational
*/
// -----
// Arduino pins:
// -----
// 0 RX -> Reserved by Arduino
// 1 TX -> Reserved by Arduino
// 2 LCD (High order data, not used)
// 3 LCD (High order data, not used)
// 4 LCD (High order data, not used)
// 5 LCD (High order data, not used)
// 6 Red LED
// 7 Green LED
// 8 Blue LED
// 9 Digital Thermistor (DS18B20)
// 10 Digital Thermistor (DS18B20)
// 11 LCD pin 6 "Enable"
// 12 LCD pin 4 "rs"
// 13 ** free **
#include <OneWire.h> //This library controls the digital thermistors
#include <LiquidCrystal.h> //This library controls the LCD
#include <cmath.h>
OneWire ds(9); // First Digital Thermistor on pin 9 (a 4.7K resistor is needed)
OneWire ds1(10); // Second Digital Thermistor on pin 10 (a 4.7K resistor is needed)
// Several thermistor could have been connected to only one pin
// since Arduino can get the address of each one but this way
// would introduced a delay of one second between the measure of thermistor
// so we have preferred use two pins.
double V0,V1;
float t = 0; // This number counts the time passed after starting Arduino ON
// The LEDs are connected to a common resistor of 10 kOhm.
// RED LED -> Arduino DIGITAL pin 6
// GREEN LED -> Arduino DIGITAL pin 7
// BLUE LED -> Arduino DIGITAL pin 8
int led = 0; // This variable indicates the active LED
// LCD Connections:
// rs (LCD pin 4) to Arduino pin 12
```

```

// rw (LCD pin 5) to Arduino Ground
// Enable (LCD pin 6) to Arduino pin 11
// LCD pins d4, d5, d6 to Arduino pins 5, 4, 3, 2
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); // ( rs, Enable, High order data -not used-)
void setup(void) {
  Serial.begin(9600); // Establece la velocidad de datos en bits/segundo (baudios)
  // para transmision de datos en serie entre Arduino y Ordenador.
  lcd.begin(16, 2); // Columns and Rows. Use (16,2) for a 16x2 LCD.
  presentacion();
  lcd.print("Temperatura en"); // Text displayed in LCD
  lcd.setCursor(0,1); // Set cursor to Column 0, Row 0 (the first row)
  lcd.print("la camara (C)");
  delay(2000); // This delay let the user to read the message
  // Configura el pin de los LEDs en modo "salida"
  pinMode( 6, OUTPUT);
  pinMode( 7, OUTPUT);
  pinMode( 8, OUTPUT);
}
void loop(void) {
  // "byte" se define en <Arduino.h> como "typedef uint8_t byte"
  // o sea, como un "unsigned integer of length 8 bits"
  // o sea, como un numero entre 0 y 254. Es un ENTERO de 8 bits.
  // De modo que "byte addr[8]" es un ARRAY de 8 "unsigned integers of length 8 bits"
  // o sea, "8 bits x 8 vector array" = 64 bits !
  byte i;
  byte data[12];
  byte addr[8];
  byte data1[12];
  byte addr1[8]; //addr are matrix that will save the address of the disital thermistors and data will save the
information about temperature codex in binary
  float c1,c2,c3,c4; //These variables will carry the Temperature in Celsius
  // "search" es una funcion definida en "OneWire.cpp"
  ds.search(addr);
  ds.reset_search();
  ds1.search(addr1);
  ds1.reset_search();
  //These instruction give us the address of each digital thermistor
  // ----- THERMISTORS READY TO WORK -----
  ds.reset(); // Before every communiton we have to RESET the thermistors and select them after it
  ds.select(addr);
  // To get a temperature measurement we need to issue CONVERT[44h] command.
  // When sensors receive it, they initiate the data conversion process to produce a 2 bytes number
  // with the measurement -> this is a slow process which requires 750 ms at the highest precision.
  ds.write(0x44, 1); // We send an hexadecimal value that means "be ready for the measure"
  delay(1000); // We wait 1000 ms to let the thermistor to charge
  // We repeat the process with the other thermistor
  ds1.reset();
  ds1.select(addr1);
  ds1.write(0x44, 1);
  delay(1000);
  // ----- THERMISTORS TAKE DATA -----
  ds.reset();
  ds.select(addr);
  ds.write(0xBE); // This commands makes the thermistor take a measure of temperature
  // No 2nd argument in "write" function -> POWER=0 (default)!
  ds1.reset();
  ds1.select(addr1);
  ds1.write(0xBE);
  // ----- READ data from NTC Thermistors and convert it to RESISTANCE [Ohm] --
  V0 = analogRead(0); // Arduino reads the voltaje in the potencial divisor and send it to a function which calculate
the temperature
  V1 = analogRead(1); // The "AnalogRead" output is a

```

```

c3 = RtoTemp(V0); // Convert Voltage to Temperature using calibration curve
c4 = RtoTemp(V1);
// ----- READ data from Digital Thermistors and convert it to RESISTANCE [Ohm] --
for ( i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
// The information from the Digital thermistor (temperature) is saved in the matrix "data".
// The temperature is saved in the first two bytes, the other are information about address, alarms, etc.
data[i] = ds.read(); // Aqui leemos 1 "byte" (de 8 bits)
data1[i] = ds1.read();
}
// (data[1] << 8) Esta operacion mueve los 8 bits de "data[1]" a la izquierda 8 posiciones
// ( | data[0]) y hace un .OR. con "data[0]" -> o sea, que "junta" los dos bytes en uno
// creando una palabra de 16 bits "int16_t raw".
int16_t raw = ( (data[1] << 8) | data[0] );
c1 = (float)raw / 16.0; // Ahora convertimos los bytes a decimal y dividimos por 16=2^4 para convertirlo
// en el valor de la medida final (temperatura con decimales)
raw = (data1[1] << 8) | data1[0]; // Repetimos las operaciones con datos del segundo Digital Thermistor.
c2 = (float)raw / 16.0;
t = t + 2 ; // increase the "time"
// ----- LEDs ON and OFF: cloud chamber temperature status -----
led = compTemp(c2,led);
// ----- WRITE data in Serial Port -----
// This data will be read by "gtkterm" and stored in external file.
Serial.print(t);
Serial.print(" ");
Serial.print(c1);
Serial.print(" ");
Serial.print(c2);
Serial.print(" ");
Serial.print(c3);
Serial.print(" ");
Serial.println(c4);
// ----- DISPLAY data in LCD -----
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(c1);
lcd.print(" ");
lcd.print(c3);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(c4);
lcd.print(" ");
lcd.print(c2);
}
// =====
float RtoTemp(double V){
// This function calculates the temperature (in Celsius)
// using the formula given by the manufacturer with the coefitient
// given by fitting the calibration curve (measured by us).
float R,T;
float Shift_Fluke_Digital = 0. ;
//This is not actually resistance, is log(R/Rref), with Rref=10 kOhm
R = log( 1024/V - 1 );
T = ( 1. /(0.00337 + 0.000149*R + 8.967e-5*R*R - 1.711e-5*R*R*R) - 273.15 + Shift_Fluke_Digital ) ; // NTC
Calibration curve
// The 273.15 converts Kelvin to Celsius
return T; // Temperature in Celsius
}
// =====
// =====
int compTemp(double down, int led){
// This function switchs ON a LED depending on temperature in the chamber.
// If temperature at the BOTTOM is above 0°C the RED LED lights
if ( down>5 ){

```



```

if (led!=6){ // Only switch ON the LED if it isn't ON yet.
// We put this "if" apart from the other to avoid the program
// check the other option of temperature if the good is this.
digitalWrite(led,LOW); // Put at 0V the pin -> switch off the LED
led = 6;
digitalWrite(led,HIGH); // Put at +5V the pin -> switch on el LED
}
}
// If temperature at the BOTTOM is below 5°C the GREEN LED lights
else if( down>-5 ){
if(led != 7){
digitalWrite(led,LOW);
led = 7;
digitalWrite(led,HIGH);
}
}
// If temperature at the BOTTOM is below -5°C the BLUE LED lights.
else {
if(led != 8){
digitalWrite(led,LOW);
led = 8;
digitalWrite(led,HIGH); } }
return led; }
void presentacion(){
int i;
for(i=0;i<3;i++){
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("UNIV. GRANADA");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("FAC. CIENCIAS");
delay(1500);
lcd.clear();
delay(300);
}
for(i=1;i<4;i++){
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("TRAB. FIN GRADO");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Luis Miguel G.");
delay(1500);
lcd.clear();
delay(300);
}
return;
} // =====

```

E. CODIGO ROOT DE ANALISIS DE TERMISTORES

A continuación se muestra el programa en ROOT que se elaboró para representar en tiempo real un gráfico de la temperatura medida por cada termistor a partir del módulo Arduino (ver apéndice D). Es importante notar que el nombre del fichero que crea la terminal avanzada con los datos de Arduino puede variar de modo que la línea de código que abre este fichero es también variable.

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <iostream> // std::cout
#include <algorithm> // std::min
// Reads the points from a file and produces a simple graph. // Author: Luismi (May 2014)
void Plot_Arduino_Data_1Canvas()
{
TStyle *pdStyle= new TStyle("Arduino","Arduino style");
UInt_t SleepTime = 3000. ; // Sleep time in milliSeconds
// Pinto();
// -----
// Define Graphs
//
TGraph *gr_R1NTC_Time, *gr_R2NTC_Time, *gr_R1DS_Time, *gr_R2DS_Time;
gr_R1NTC_Time = new TGraph() ; gr_R2NTC_Time = new TGraph() ;
gr_R1DS_Time = new TGraph() ; gr_R2DS_Time = new TGraph() ;
// -----
// Open and Read input data file (Arduino Data)
//
char TEXTO[256];
float rintc, r2ntc, r1ds, r2ds;
float Rall_min = 99999. ;
float Rall_max = -99999. ;
float time;
int new_point = 0;
// sprintf( TEXTO, "Arduino_data.txt" );
sprintf( TEXTO, "cutecom.dat" );
cout << "Opening File with Arduino data = " << TEXTO << endl;
FILE *fArduino = fopen(TEXTO, "r"); // Open file
while (!feof(fArduino))
{
fscanf( fArduino, "%f%f%f%f", &time, &r1ds, &r2ds, &rintc, &r2ntc);
cout << time<<" " << r1ds << " " << r2ds <<" "<< rintc << " " <<r2ntc << endl;
gr_R1NTC_Time->SetPoint(new_point, (float)new_point, rintc);
gr_R2NTC_Time->SetPoint(new_point, (float)new_point, r2ntc);
gr_R1DS_Time->SetPoint( new_point, (float)new_point, r1ds);
gr_R2DS_Time->SetPoint( new_point, (float)new_point, r2ds);
float Rmin = std::min(rintc, r2ntc); // Find minimum among the 4 sensors...
Rmin = std::min(Rmin, r1ds);
Rmin = std::min(Rmin, r2ds);
float Rmax = std::max(rintc, r2ntc); // Find maximum among the 4 sensors...
Rmax = std::max(Rmax, r1ds);
Rmax = std::max(Rmax, r2ds);
if (Rmin < Rall_min) Rall_min = Rmin*0.95;
if (Rmax > Rall_max) Rall_max = Rmax*1.05;
cout <<new_point<< " estoy aqui " << time << " " << rintc << " Rall_min= "<< Rall_min <<endl;
new_point++;
}
fclose(fArduino);
cout << "Rall_min= " << Rall_min << endl;
// -----
// Define general graph cosmetics
//
Color_t tcolorDS1 = 4 ;
```

```

Color_t tcolorDS2 = 7 ;
Color_t tcolorNTC1 = 6 ;
Color_t tcolorNTC2 = 2 ;
Size_t msize = 0.7 ;
Style_t mstyle = 20 ;
Double_t X1, X2, Y1, Y2;
X1 = 1. ;
X2 = (new_point*1.05) ;
Y1 = Rall_min ;
Y2 = Rall_max ;
TCanvas *canGrRNTC = new TCanvas("canGrRNTC", "Graph: Thermistor NTC 10K vs time", 1000, 800);
canGrRNTC->SetGrid();
canGrRNTC->Draw();
TH2F *Ejes1=new TH2F("Ejes1","", 1, X1, X2, 1, Y1, Y2 );
Ejes1->SetYTitle("Thermistor Temperature (^{o}C)");
Ejes1->SetXTitle("Time (sec)");
Ejes1->SetTitleOffset(1.1);
Ejes1->GetXaxis()->CenterTitle();
Ejes1->GetYaxis()->CenterTitle();
Ejes1->SetStats(0);
Ejes1->Draw();
// Digital DS Thermistors
gr_R1DS_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R1DS_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R1DS_Time->SetMarkerColor(tcolorDS1); gr_R1DS_Time->SetLineColor(tcolorDS1);
gr_R1DS_Time->Draw("PL same");
gr_R2DS_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R2DS_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R2DS_Time->SetMarkerColor(tcolorDS2); gr_R2DS_Time->SetLineColor(tcolorDS2);
gr_R2DS_Time->Draw("PL same");
// NTC Thermistors
gr_R1NTC_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R1NTC_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R1NTC_Time->SetMarkerColor(tcolorNTC1); gr_R1NTC_Time->SetLineColor(tcolorNTC1);
gr_R1NTC_Time->Draw("PL same");
gr_R2NTC_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R2NTC_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R2NTC_Time->SetMarkerColor(tcolorNTC2); gr_R2NTC_Time->SetLineColor(tcolorNTC2);
gr_R2NTC_Time->Draw("PL same");
// Draw the Legend
TLegend leg(.13,.68,.34,.89," ");
leg.SetFillColor(0);
leg.AddEntry(gr_R1NTC_Time,"NTC Top", "p");
leg.AddEntry(gr_R2NTC_Time,"NTC Bottom", "p");
leg.AddEntry(gr_R2DS_Time, "Digital Top", "p");
leg.AddEntry(gr_R1DS_Time, "Digital Bottom", "p");
leg.DrawClone("Same");
canGrRNTC->Modified();
canGrRNTC->Update();
Ejes1->Reset();
// -----
// R e f r e s h d a t a every SleepTime milliseconds
//
for (int i=0; i<100; i++)
{
cout << " Loop "<< i << " Points= "<< new_point <<endl;
gSystem->Sleep ( SleepTime );
// -----
// Update data Graph ...
// -----
FILE *fArduino = fopen(TEXT0, "r");
int np=0;
while (!feof(fArduino))
{
fscanf( fArduino, "%f%f%f%f%f ", &time, &r1ds, &r2ds, &r1ntc, &r2ntc);
np++;
}
}

```

```

if (np == (new_point+1))
{
new_point++;
gr_R1NTC_Time->SetPoint(new_point, (float)new_point, r1ntc);
gr_R2NTC_Time->SetPoint(new_point, (float)new_point, r2ntc);
gr_R1DS_Time->SetPoint( new_point, (float)new_point, r1ds);
gr_R2DS_Time->SetPoint( new_point, (float)new_point, r2ds);
float Rmin = std::min(r1ntc, r2ntc); // Find minimum among the 4 sensors...
Rmin = std::min(Rmin, r1ds);
Rmin = std::min(Rmin, r2ds);
float Rmax = std::max(r1ntc, r2ntc); // Find maximum among the 4 sensors...
Rmax = std::max(Rmax, r1ds);
Rmax = std::max(Rmax, r2ds);
if (Rmin < Rall_min) Rall_min = Rmin*0.95;
if (Rmax > Rall_max) Rall_max = Rmax*1.05;
}
}
fclose(fArduino);
// -----
// -----
X2 = new_point*1.05 ;
Y1 = Rall_min ;
Y2 = Rall_max ;
TH2F *Ejes1=new TH2F("Ejes1","", 1, X1, X2, 1, Y1, Y2 );
Ejes1->SetYTitle("Termistor Temperature (^{o}C)");
Ejes1->SetXTitle("Time (sec)");
Ejes1->SetTitleOffset(1.1);
Ejes1->GetXaxis()->CenterTitle();
Ejes1->GetYaxis()->CenterTitle();
Ejes1->SetStats(0);
Ejes1->Draw();
// Digital DS Thermistors
gr_R1DS_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R1DS_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R1DS_Time->SetMarkerColor(tcolorDS1); gr_R1DS_Time->SetLineColor(tcolorDS1);
gr_R1DS_Time->Draw("PL same");
gr_R2DS_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R2DS_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R2DS_Time->SetMarkerColor(tcolorDS2); gr_R2DS_Time->SetLineColor(tcolorDS2);
gr_R2DS_Time->Draw("PL same");
// NTC Thermistors
gr_R1NTC_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R1NTC_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R1NTC_Time->SetMarkerColor(tcolorNTC1); gr_R1NTC_Time->SetLineColor(tcolorNTC1);
gr_R1NTC_Time->Draw("PL same");
gr_R2NTC_Time->SetMarkerStyle(mstyle); gr_R2NTC_Time->SetMarkerSize(msize);
gr_R2NTC_Time->SetMarkerColor(tcolorNTC2); gr_R2NTC_Time->SetLineColor(tcolorNTC2);
gr_R2NTC_Time->Draw("PL same");
canGrRNTC->Modified();
canGrRNTC->Update();
Ejes1->Reset();
// Draw the Legend
TLegend leg(.13,.68,.34,.89," ");
leg.SetFillColor(0);
leg.AddEntry(gr_R1NTC_Time,"NTC Top", "p");
leg.AddEntry(gr_R2NTC_Time,"NTC Bottom", "p");
leg.AddEntry(gr_R2DS_Time ,"Digital Top", "p");
leg.AddEntry(gr_R1DS_Time ,"Digital Bottom", "p");
leg.DrawClone("Same");
}
}
// -----
void main(){ Plot_Arduino_Data_1Canvas(); }

```