

MÁSTER EN FÍSICA AVANZADA

Especialidad en física nuclear y de partículas



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

Trabajo final de máster

Diseño de un detector de aguas tritiadas basado en fibras centelleadoras leídas por fotomultiplicadores de silicio

Marcos Martínez Roig
7 de septiembre de 2017

Tutores:

José Díaz Medina
Nadia Yahla Haddou

Índice

1. Introducción	2
1.1. Propiedades del tritio	3
1.2. Detección del tritio	4
1.3. Esquema del trabajo	6
2. Protocolo de manipulación de fibras centelleadoras	7
3. Calibración de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)	10
3.1. Equipo y montaje experimental	13
3.2. Análisis de datos	16
3.3. Calibración en temperatura	20
3.4. Calibración en voltaje de operación	22
3.5. Estabilización de la ganancia	24
4. Prototipo	26
4.1. Configuración del prototipo	26
4.2. Procedimiento de llenado	29
4.3. Configuración de la electrónica	30
4.4. Resultados	33
5. Simulaciones	37
6. Previsiones de futuro	41
7. Resultados y conclusiones	44

1. Introducción

La energía nuclear es hoy día imprescindible para proporcionar la potencia eléctrica necesaria en el mundo desarrollado. Aunque otras fuentes de energía se están desarrollando a gran velocidad (fotovoltaica, eólica, energía de las mareas, etc.), y otros conceptos de producción y ahorro de energía también (producción local, techos solares, eficiencia energética, ciudades inteligentes), es impensable por ahora paralizar la producción de energía nuclear, que proporciona una fuente estable, barata y que no depende de parámetros meteorológicos, y que desde el punto de vista de emisión de gases de efecto invernadero es relativamente limpia, ya que la única huella de carbono asociada es debida a la minería del uranio y al transporte y reciclaje del combustible. Los detractores de la energía nuclear argumentan, en cambio, el riesgo de contaminación radiactiva y los accidentes ocurridos en el pasado: Chernobil y Fukushima junto a una serie de otros accidentes de menor impacto. Otra razón importante es que las centrales nucleares son una de las raíces de la proliferación nuclear.

Se sea partidario o detractor de la energía nuclear, está claro que la seguridad de las mismas no es un aspecto negociable y que deben de existir mecanismos que adviertan de cualquier mal funcionamiento de una central nuclear. Las principales señales de alerta de mal funcionamiento de una central nuclear es la emisión de cantidades anormales de radiactividad. Una central nuclear operando en modo normal puede llegar a emitir alrededor de 300 TBq/GW_y [1]. Como hemos dicho antes, un reactor nuclear se caracteriza por una extremada estabilidad en su funcionamiento, y por ende, en una emisión constante de isótopos radiactivos. Cualquier variación de esta tasa de emisión puede ser un indicador de un problema en el reactor o el circuito de refrigeración de mismo. Entre los isótopos radiactivos emitidos por una central nuclear está el tritio, que se produce mediante captura de neutrones del deuterio presente en el agua pesada, o doble captura de neutrones del hidrógeno del agua normal, lo cual ocurre con cierta probabilidad debido al enorme flujo de neutrones de un reactor nuclear (del orden de $10^{14} \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). El tritio se emite como agua tritiada en el agua de refrigeración del circuito secundario de la central.

La detección de un exceso de tritio en tiempo cuasi real es esencial por las siguientes razones:

1. Advierte de la producción de un exceso de neutrones por el reactor nuclear, o de una fuga de agua de refrigeración del circuito primario. Ambas causas son precursores de problemas que podrían evolucionar, resultando más graves.
2. El agua de refrigeración del secundario normalmente forma parte de aguas empleadas posteriormente para la irrigación o el consumo humano. Dado que el límite máximo de actividad de tritio permitida para el consumo humano por la normativa europea es de 100 Bq/L, está claro que una contaminación de las aguas de refrigeración las convertiría rápidamente en no potables e impediría la consumición de las cosechas afectadas, ya que la vida media del tritio es de unos 12 años.
3. Muchos de los caudales de agua empleados en la refrigeración de las centrales nucleares, son transfronterizos, es decir, transcurren por dos o más países. La emisión de tritio en el país propietario de la central nuclear podría causar graves problemas en el país vecino.

Por estas razones, poder medir niveles de tritio en tiempo quasi-real es de suma importancia en un sistema de vigilancia de una central nuclear. Sin embargo, actualmente ninguna técnica permite medir niveles de actividad de tritio del orden del kBq en tiempos del orden de 10 minutos. Se pueden medir actividades del orden del Bq mediante la técnica del centelleo líquido, comentada más adelante, pero requiere tiempos de medida de unos dos días, demasiado largos en comparación con el posible ritmo de evolución de un problema en una central nuclear. Todas estas razones han motivado el proyecto Tritium, con título "Diseño, construcción y puesta a punto de estaciones automáticas para el monitoraje en tiempo real de bajos niveles radiactivos de tritio en aguas", financiado por el programa Interreg Sudoe de la CEE en la convocatoria de 2016 con número de referencia SOE1/P4/E0214", cuya finalidad es desarrollo de un detector de tritio en tiempo quasi-real basado en la tecnología de fibras centelleadoras leídas por fotomultiplicadores de silicio. Su objetivo es la construcción de un prototipo que sería instalado en el embalse de refrigeración de la central nuclear de Almaraz, en el río Tajo, cuyas aguas se emplean como agua potable en España y Portugal. La colaboración *Tritium* es un grupo internacional compuesto por 6 centros de tres países: La Universidad de Aveiro de Portugal, la Universidad de Burdeos y el CNRS (Section Aquitaine-Limousin) de Francia, y la Universidad de Extremadura, la Junta de Extremadura y la Universidad de Valencia de España. El proyecto *Tritium* es obviamente demasiado extenso como trabajo de fin de máster ya que su ejecución se prolonga durante tres años, y será la base de mi futura Tesis Doctoral. En este trabajo de fin de máster únicamente nos centraremos en los primeros pasos de este gran proyecto, el cual ha empezado recientemente y, afortunadamente, me ha permitido estar en este desde el inicio.

La creación de altos niveles de tritio es un problema que concierne no sólo a las centrales nucleares de fisión sino también a las futuras centrales de fusión termonuclear y reactores nucleares experimentales. Algunos experimentos científicos emplean elevadas cantidades de tritio. Por lo tanto, los desarrollos que se realicen dentro del marco del proyecto Tritium podrían tener un campo de aplicación más amplio que el inicialmente previsto.

1.1. Propiedades del tritio

El tritio es el tercer isótopo de hidrógeno, formado por un protón y dos neutrones. Algunos de los principales canales de producción de tritio son la captura neutrónica del D, ^6Li , ^7Li , los cuales se escriben a continuación:



Más probable todavía es que se produzca deuterio, segundo isótopo del hidrógeno (com-puesto por un protón y un neutrón), mediante la reacción



que puede formar tritio posteriormente, capturando un neutrón adicional.

El tritio es un elemento radiactivo con un período de semidesintegración de $T_{1/2} = 12,32$ años, en concreto, un emisor β^- de baja energía que emite electrones según la siguiente reacción:



donde uno de los neutrones del tritio se ha desintegrado (a partir de una interacción débil) β^- en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico:



La existencia de este antineutrino electrónico es impuesta por la conservación del número leptónico, en concreto el número leptónico de la familia del electrón (L_e). En la práctica, no tenemos la posibilidad de detectar esta partícula ya que interacciona muy débilmente con la materia ($\sigma \propto 10^{-42} \text{ cm}^2$). Es decir, escapa sin interaccionar con el detector y en su lugar, sólo detectamos su ausencia, es decir, la no conservación de ciertas cantidades físicas como energía, momento, número leptónicos, etc. de todas las partículas detectadas. Por tanto, para medir la desintegración del tritio sólo tenemos la posibilidad de detectar el isótopo estable 3He y el electrón. Hay que tener en cuenta que, aunque el isótopo hijo de la reacción de desintegración del tritio, 3He , sea estable, realmente éste se forma en un estado no estacionario, es decir, no se encuentra en un autoestado de su hamiltoniano, sino en un estado que puede expresarse como una la suma de autoestados del hamiltoniano. Como consecuencia, tras la desintegración β^- del tritio, tendremos una posterior desexcitación del 3He que producirá fotones con varias energías bien definidas que corresponden a sus niveles energéticos, fotones que podremos observar en nuestro detector. En resumen, obtendremos un espectro de desintegración del tritio junto a un espectro típico de rayos X, espectro idealmente discreto pero experimentalmente gaussiano debido a la resolución de los aparatos de medida. Dado que el 3He tiene una masa muy superior a la de los electrones, por conservación de energía y momento el 3He apenas se moverá del punto donde ocurre la reacción. Por tanto, nos centraremos en la detección del electrón. En la figura 1 se muestra el espectro energético de los electrones emitidos en la desintegración del tritio. El espectro del tritio presenta la forma típica de un espectro energético de desintegración β , con una energía máxima de 18,6 keV, una energía promedio de 5,7 keV y una moda (valor más probable) ligeramente inferior a la energía promedio, entorno a 4,5 keV. La energía de radiación del tritio es la más pequeña observada en un isótopo. Como consecuencia, el electrón presentará un recorrido libre medio muy corto, del orden de 3 – 5 mm en el aire y de 5 – 6 μm en un medio sólido [3].

1.2. Detección del tritio

El problema que Tritium pretende resolver reside en que los mecanismos de detección y monitorización de tritio utilizados en la actualidad en centrales nucleares, que será el objetivo final del detector que pretendemos desarrollar en el grupo experimental internacional denominado *Tritium*, son métodos lentos o con un alto umbral de detección [4, 5, 6, 7]. Por ejemplo, entre los métodos más empleados actualmente en centrales nucleares, está el método de detección por centelleo líquido. Este es el método más indicado para la detección de partículas beta de energía

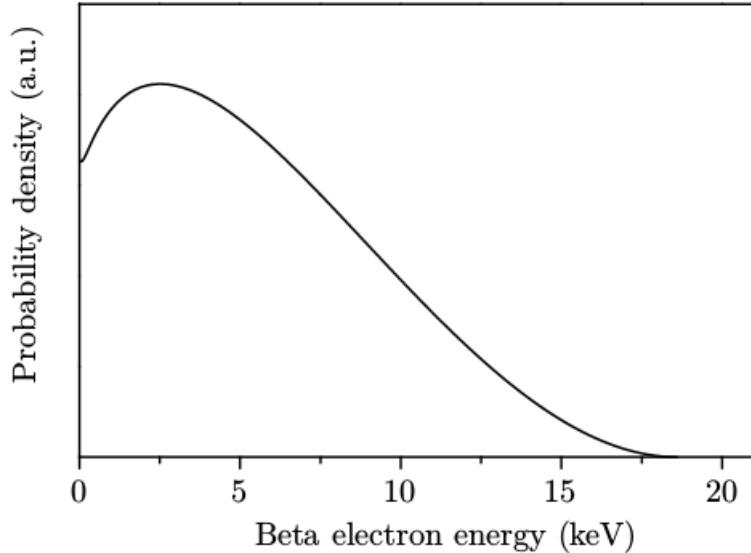


Figura 1 – Espectro energético de los electrones de la desintegración del tritio [2]

muy pequeña porque, como ya se ha visto al analizar el espectro energético de los electrones de la radiación β del tritio, éstos tienen un recorrido libre medio muy pequeño (del orden del mm o μm , dependiendo del medio [3]). Dado que sólo se pueden medir (con una probabilidad aceptable) las emisiones que han tenido lugar a una distancia del detector inferior al recorrido libre medio, la forma más efectiva de conseguir que un mayor volumen de la fuente radiactiva contribuya a la señal y que un mayor volumen del detector se encuentre a una distancia adecuada de la fuente radiactiva, es disolviendo este detector con el líquido radiactivo (en nuestro caso agua tritiada), y ésto sólo se puede conseguir utilizando detectores líquidos de partículas beta, como el líquido centelleador. El método de centelleo líquido consiste en tomar una muestra del líquido radiactivo, agua tritiada en nuestro caso, diluirla (habitualmente al 50 %) con el líquido centelleador y medir los fotones emitidos por este líquido centelleador mediante un tubo fotomultiplicador para determinar los electrones detectados por el líquido centelleador. Sin embargo, para ello se necesita tomar una muestra y llevarla al laboratorio para su análisis, ya que los aparatos comerciales de centelleo líquido no son portátiles. En resumen, se trata de un proceso de detección de agua tritiada basado en métodos off-line que ralentizan la monitorización, dilatando el resultado hasta varios días desde la toma de la muestra. Además, tras cada análisis, la muestra de agua tritiada y líquido centelleador son inseparables y por tanto no reutilizables. El líquido centelleador debe de ser tratado como residuo peligroso ya que, aunque el análisis desvela que el agua tritiada está libre de tritio (presente una actividad suficientemente baja para ser tratada como material no radiactivo), el líquido centelleador contiene tolueno y, por tanto, debe de ser desecharlo de acuerdo con el protocolo de residuos químicos peligrosos, y en particular no puede ser vertido al medio ambiente, como es el caso de las aguas de refrigeración de una central nuclear. También necesita operarios especializados manipulen estas muestras *in situ*, por lo que no es planteable en un sistema automático no asistido [8].

1.3. Esquema del trabajo

El objetivo final de *Tritium*, sobre el cual tratará mi futura Tesis Doctoral, es desarrollar un detector de aguas tritiadas que permita realizar la monitorización del tritio *in situ* en tiempo cuasi-real. Por tiempo cuasi-real entendemos una dilatación temporal máxima de unos 10 minutos desde la toma de la muestra (ya que se necesita un tiempo mínimo para poder discernir la señal del fondo, el cual dependerá, entre otras cosas, de la configuración del sistema de detección). Además, el prototipo desarrollado no necesitará de la presencia de personal especializado que intervenga en el proceso de monitorización de aguas tritiadas, agilizando y abaratando el método de monitorización, además de excluir posibles errores humanos. El método simplemente requerirá continuas calibraciones al cabo de un tiempo determinado para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo.

La dificultad aquí residirá en conseguir extraer esta señal tan pequeña ($\sim 1 \text{ keV}$) y tener estadística suficiente para poder discernirla del fondo radiactivo en un tiempo tan pequeño. El proyecto *Tritium* pretende llegar a realizar detecciones en el límite de actividades de la muestra de agua tritiada entorno a 0,1 o 1 kBq/L, lo cual nos permitirá generar mensajes de alarma cuando la muestra supere el límite recomendado por la Comunidad Europea, 100 Bq/L. Los trabajos *in situ* con configuraciones del detector similares (centelleador + fotosensor) realizados hasta la fecha que utilizan el concepto de tiempo real sólo han conseguido obtener una señal en el límite del MBq/L [2] o incluso decenas de kBq/L [4]. Estos detectores están basados principalmente en plásticos centelleadores y tubos fotomultiplicadores (PMT) a diferencia de nuestro experimento, que consta de fibras centelleadoras (que detectan la radiación beta del tritio y la convierten en fotones) y tubos fotomultiplicadores o fotomultiplicadores de silicio (que detectan estos fotones y los convierten en electrones que conformarán la señal del sistema). En mi opinión, el uso de fibras centelleadoras es una mejor elección ya que presentan un mayor volumen activo con el que detectar la radiación del tritio, sin necesidad de utilizar líquido centelleador, el cuál, como he mencionado anteriormente, produce residuos peligrosos, además del coste del líquido centelleador no reutilizable. Además, las fibras centelleadoras presentan un mayor abanico de posibilidades en cuanto a la elección de las distintas estructuras de las mismas. Nuestro experimento se centrará en la utilización de SiPM, ya que estos presentan una mayor eficiencia de fotodetección y necesitan un voltaje de alimentación de unas decenas de voltios, que se puede producir fácilmente mediante paneles solares, aunque también contemplaremos el uso de PMT.

Existen métodos de detección de tritio que logran llegar a límites del orden del bequerelio en un tiempo de 3 minutos, aunque están basados en configuraciones totalmente distintas, como por ejemplo un sistema formado por un láser y cavidades espectroscópicas en forma de anillo, en el cual se busca la existencia de resonancias y se relaciona las frecuencias a las que estas ocurren con la concentración de tritio presente en la muestra [9]. Sin embargo, este método necesita condiciones para el correcto funcionamiento del láser de difícil implantación en sitios como centrales nucleares, es decir, es una aplicación que no persigue un mismo fin.

Para conseguir extraer una señal tan pequeña con la mayor eficiencia posible, estudiaremos diversas configuraciones experimentales para obtener la más adecuada. Además, realizaremos detecciones en coincidencia, lo cuál nos permitirá eliminar en gran medida el fondo radiactivo.

Los aspectos que pretendemos estudiar son:

- La mejor elección de las estructuras de fibras centelleadores. Estudiaremos las ventajas y desventajas que presenta la utilización clads y reflectores en las fibras (recubrimiento de la fibra centelleadora para evitar la fuga de fotones de centelleo y poder dirigir estos de manera ópticamente aceptable hasta el fotosensor).
- La mejor elección del fotosensor. Las posibilidades contempladas en el experimento serán SiPM o PMT. Decidiremos el más adecuado, ya que cada uno presenta una serie de características favorables como la eficiencia de fotodetección (PDE) de los SiPM sobre la de los PMT pero otras desfavorables como la fuerte dependencia de la temperatura de los SiPM.
- Simulaciones del experimento utilizando el programa Geant 4 [10, 11, 12]. Estas simulaciones permitirán comparar nuestros resultados experimentales con los datos simulados, lo que permitirá comprobar la fiabilidad del diseño y mejorarlo en lo posible.

Dividiremos este trabajo en seis partes:

1. En primer lugar se realizará un estudio sobre las fibras centelleadoras para determinar el protocolo de manipulación para obtener un procedimiento de preparación de un haz de fibras centelleadoras con un buen rendimiento óptico.
2. En segundo lugar estudiaremos el procedimiento de calibración de los SiPM, fundamental para el experimento. No se necesita realizar una calibración de los PMT, paso igualmente importante al anterior, ya que este trabajo fue realizado recientemente por otro componente del grupo.
3. En tercer lugar se describirá el primer prototipo diseñado, formado por un haz de 35 fibras centelleadoras sin clad leídas por PMT, incluyendo el protocolo del proceso de llenado que tuvo que ser desarrollado para cumplir los requisitos de protección radiológica y evitar contaminación accidental, y los resultados obtenidos con el mismo.
4. En cuarto lugar se presentarán las simulaciones realizadas con el programa de Geant4 en una configuración sencilla.
5. En quinto lugar, se expondrán aspectos a estudiar en el futuro inmediato y en etapas posteriores, durante la Tesis Doctoral.
6. Se presentarán finalmente los resultados, logros y conclusiones alcanzadas en el desarrollo del trabajo.

2. Protocolo de manipulación de fibras centelleadoras

Como se ha comentado anteriormente, el primer paso para monitorizar los niveles de agua tritiada es detectar los electrones que se producen en la desintegración β^- del tritio (ecuación (5)). Para ello, se utilizó fibras centelleadoras existentes en el mercado, seleccionadas por sus

características favorables para nuestro experimento [15]. Se determinó que las fibras BCF-12 de Saint Gobain eran las que mejor se ajustaban a los requisitos del experimento.

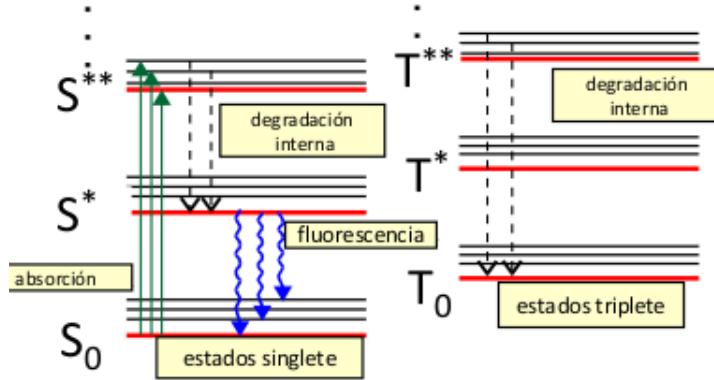


Figura 2 – Esquema de niveles energéticos de un material centelleador [16]

Un plástico centelleador está dopado con materiales luminiscentes cuyas moléculas poseen niveles energéticos similares a los de la figura 2, donde los estados S representan singletes y los estados T triplettes. Cuando la radiación ionizante, en nuestro caso los electrones procedentes del tritio, atraviesan el centelleador, sus moléculas absorben la energía, produciéndose una excitación de las mismas. A continuación éstas se desexcitan, en primer lugar desde niveles superiores hasta el nivel S^* o T_0 por degradación interna (en un tiempo del orden del ps) y seguidamente del S^* hasta S_0 (en un tiempo del orden del ns). En esta segunda desexcitación se emiten fotones, cuya longitud de onda puede ir desde el ultravioleta hasta el infrarrojo [100 – 800nm], dependiendo de la distancia existente entre estos niveles energéticos. La emisión de estos fotones se conoce con el nombre de fluorescencia, y es el mecanismo que produce la señal de respuesta de un material centelleador orgánico(Fig. 8). Las fibras centelleadoras son transparentes a los fotones que se encuentran en la longitud de onda de su emisión, ya que, de lo contrario, tendríamos una reabsorción de los fotones emitidos antes de ser detectados por el fotosensor, inhibiendo la señal.

Los materiales centelleadoras presentan una muy buena linealidad con la energía de la radiación incidente a partir de una energía mínima, que determina la sensibilidad del material centelleador. Teniendo en cuenta que los SiPM también presentan una muy buena linealidad con la señal recibida, esperamos obtener una respuesta de nuestro detector que presente una buena linealidad con la energía de la señal.

Por lo general, los plásticos centelleadores producen señales bastante rápidas en comparación con otros tipos de detectores. Utilizamos fibras centelleadoras orgánicas, ya que estas son 2 o 3 órdenes de magnitud más rápidas que las inorgánicas, en concreto, las fibras que utilizaremos presentan un tiempo de atenuación de 3,2 ns [17]. Poseen un índice de refracción de $n = 1,6$, parámetro fundamental a la hora de transportar eficientemente la luz.

Las fibras centelleadoras elegidas deben de producir el mayor número de fotones posible por unidad de energía para poder tener una señal lo mayor posible. Las fibras BCF-12 producen unos 8000 fotones por MeV de la radiación incidente y tienen una eficiencia de fotodetección del 3,4 % [17].

Para manipular las fibras se vio necesario la utilización de guantes de látex, ya que el

contacto con las manos las ensuciaban, afectando a la propagación de la luz.

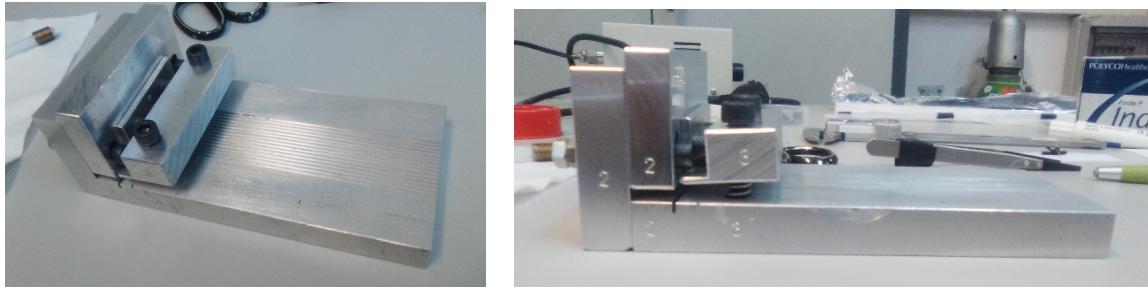


Figura 3 – Guillotina

Para poder cortar las fibras centelleadoras de forma ópticamente aceptable, se diseñó y construyó una guillotina adecuada en los talleres del IFIC [15, 18, 19, 20], la cual se muestra en la figura 3. En la parte derecha de la figura se puede observar que la guillotina está constituida de dos piezas independientes (marcadas con los números 2 y 3), las cuales están suspendidas por muelles. Para sujetar y cortar las fibras, hay que pulsar secuencialmente las piezas 3 y 2. La guillotina dispone de 14 rieles cuadrados, los cuales sirven para sujetar cada una de las fibras y, así, obtener un corte limpio y perpendicular. Aunque la guillotina tiene la posibilidad de realizar cortes simultáneos sobre varias fibras centelleadoras, siempre se realizaron cortes sobre una única fibra. De esta forma asegurábamos un mejor acabado.

Se estuvo probando con varios tipos de cuchilla (de distinto grosor y tamaño), y se obtuvo que una cuchilla típica de afeitar era adecuada. Hay que tener en cuenta que, para un corte más efectivo, se introdujo en la disposición de la cuchilla una ligera inclinación [15, 18].

En la figura 4 izquierda, obtenida con ayuda de un microscopio, se puede ver la cara de una fibra óptica con clad recién cortada. En ésta figura podemos apreciar que, aunque presenta una acabado realmente bueno (sin roturas ni deformaciones), la cara de la fibra se encuentra ligeramente dañada, lo que afecta a la transmisión de la luz. La forma de subsanar este problema fue pulir cada una de las caras de las fibras. En la parte derecha de la misma figura podemos observar una foto con la misma fibra tras el proceso de pulido. Podemos comprobar que el simple hecho de pulir las caras de las fibras nos permite mejorar sensiblemente el acabado óptico [15, 21]. Hay que notar en la figura que el clad está roto. Se vio que esto era una característica inevitable

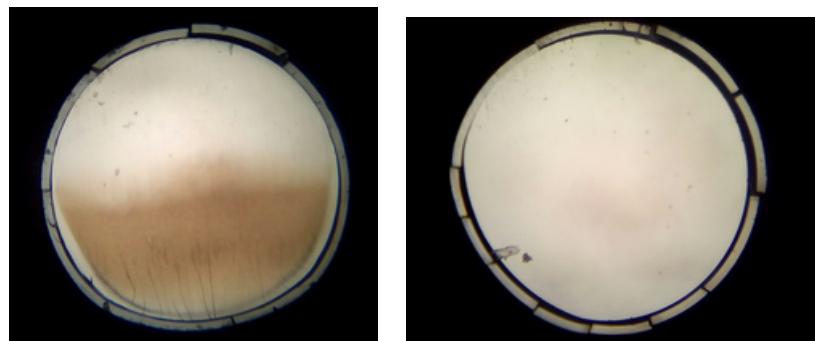


Figura 4 – Cara fibras

del proceso de cortado. Sin embargo, pudo observarse que la ruptura únicamente se encontraba en el extremo final de la fibra, por lo que la utilización de grasa óptica (Saint-Gobain, BC-360)

para acoplar ésta al fotosensor solucionaba el problema. De todas formas, las fibras centelleadoras empleadas en este trabajo no tienen clad, por lo que no les afecta este problema.

Seguidamente, con las fibras ya cortadas, se utilizó un pegamento óptico (también de la marca Saint Gobain), especialmente diseñado para materiales centelleadores, para pegarlas entre ellas y obtener, de esta forma, un haz de fibras. Para que su acabado fuese suficientemente rígido se introdujo cada uno de los extremos del haz de fibras en un anillo metálico, mostrado en la figura 5. En la figura 5 derecha puede observarse que los anillos disponen de una tuerca, la cual se utiliza para una completa sujeción al prototipo. Finalmente, cuando se había secado el pegamento, volvimos a pulir cada una de las caras del haz de fibras con el objetivo de obtener una cara completamente plana (todas las fibras al mismo nivel) para obtener un acoplamiento óptimo con el fotosensor (ya sea SiPM o PMT). En la figura 6 podemos observar un haz de fibras totalmente acabado.



Figura 5 – Aro metálico



Figura 6 – Haz de fibras centelleadoras

El haz construido consiste de 35 fibras, que es el mayor número de fibras que cabe en el interior del anillo metálico, y tiene una longitud de aproximadamente 25cm, extensión acorde con el prototipo. En la figura 6 derecha, podemos observar la cara final pulida, perfectamente plana. Hay que tener en cuenta que cualquier irregularidad inferior al milímetro en la cara final del haz es subsanada por la grasa óptica empleada para acoplar el haz de fibras al fotosensor.

3. Calibración de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)

El siguiente paso consiste en leer los fotones de la luz de centelleo. Para ello, una de las alternativas que contempla nuestro estudio es la utilización de un fotomultiplicador de silicio, que abreviaremos de ahora en adelante por SiPM. El SiPM es un dispositivo de detección de radiación relativamente nuevo en el mercado, que surge como alternativa al tubo fotomultiplicador. Consiste en una matriz bidimensional formada por múltiples pixels independientes y alimentados en paralelo (mismo voltaje operacional para cada uno) a un voltaje tal que les permita funcionar en modo Geiger. Cada uno de los pixels actúa como un APD (fotodiodos de

avalancha) [22]. Cuando detectan un fotón, estos pixels producen una cascada de pares electrón-hueco, que forman la señal del sistema de detección, la cual estará formada por la suma de las señales de los pixel que han detectado un fotón para cada instante de tiempo. Idealmente, cada pixel únicamente puede detectar un fotón. Si varios fotones caen en el mismo pixel, entonces la señal es más reducida con respecto de la señal correspondiente a cada fotón en pixeles diferentes. Esto origina una pérdida de la linealidad de la señal de respuesta con la intensidad de la luz, para intensidades de luz elevadas. Dado que poseen una alta eficiencia de fotodetección, los SiPM son utilizados como fotosensores, especialmente para señales débiles. Los SiPM poseen una serie de características distintas de los convencionales tubos fotomultiplicadores que los hacen ideales en unas situaciones y no tanto en otras, como por ejemplo su tamaño compacto, inmunidad a campos magnéticos, electrónica sencilla, alta eficiencia de detección de fotones (especialmente adecuado para nuestro experimento), buena linealidad, dependencia con la temperatura significativa, alta ganancia a menor voltaje de alimentación y, por extensión, menor consumo, tiempo de respuesta corto y, por extensión, buena resolución temporal [23].

Hay que tener en cuenta que los SiPM son detectores de estado sólido y, en consecuencia, presentan ruido térmico, ruido que se verá amplificado por el hecho de estar operando en modo Geiger-Muller. Este ruido se denomina corriente oscura (Dark counts) y su forma se ve reflejada en la figura 7.

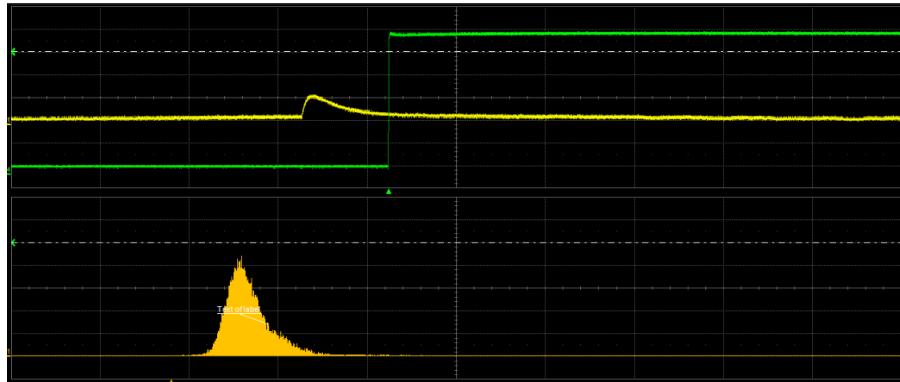


Figura 7 – Dark counts

Cuando trabajamos con detectores de estado sólido debemos trabajar en condiciones óptimas de voltaje operacional y temperatura, ya que las cuentas oscuras dependen de estas magnitudes y pueden llegar a ser tan numerosas que enmascaren por completo la señal que queremos medir. También podemos reducir su importancia sobre la medida con ayuda de triggers, por ejemplo, medir únicamente cuando la señal de entrada del sistema este activa (si se conoce este intervalo de tiempo). En cualquier caso, siempre se deberá realizar una medida del pedestal (señal de respuesta para señal de entrada nula) para tener en cuenta el número y características de los eventos que van a producir una señal sin corresponder a los sucesos que deseamos medir, y utilizar esta información para el posterior análisis.

En esta sección, desarrollamos un método de compensación para las variaciones de la ganancia de un fotomultiplicador de silicio producidas por variaciones de la temperatura y del voltaje de alimentación del SiPM (voltaje de polarización inversa), de ahora en adelante llamado voltaje operacional.

En concreto, utilizaremos el modelo S13360-1375CS de Hamamatsu Photonica. Se ha elegido este modelo debido a que presenta una eficiencia de fotodetección máxima entorno a los 450 nm, que corresponde aproximadamente a la longitud de onda del azul, 435 nm y, en concreto, se asemeja bastante con el máximo de la energía reemitida por las fibras centelleadoras BCF-12, 435 nm, encargadas de detectar la radiación β del agua tritiada en nuestro experimento, como puede apreciarse en la figura 8. De esta forma conseguiremos que la señal sea tan grande como sea posible, algo fundamental ya que, como ya se ha mencionado, una de las principales dificultades del experimento es que estamos intentando medir una señal muy pequeña.

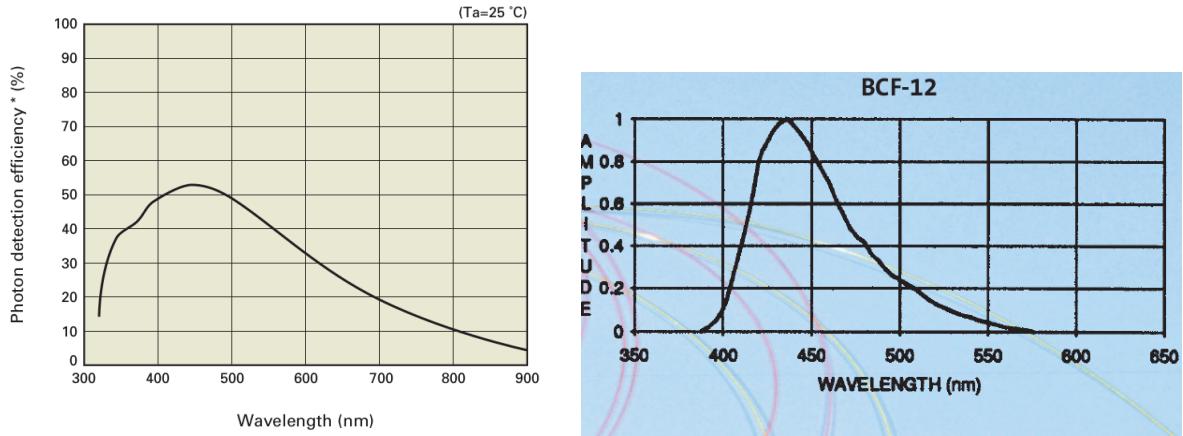


Figura 8 – PDE del SiPM [24] y espectro de emisión de las fibras [17] respectivamente

La forma de abordar este método de compensación de la ganancia ha sido el siguiente:

1. Por un lado se ha realizado una calibración de la ganancia frente a la temperatura, obteniendo su relación de dependencia. Para ello, se ha necesitado la utilización de un sistema de control de temperatura. En concreto se ha utilizado un sistema de la marca DYCOMETAL, (modelo CCM 81), que permite controlar temperatura y humedad relativa con una precisión de 0,1 °C y 0,5 % respectivamente.
2. Por otro lado se ha realizado una calibración de la ganancia frente al voltaje operacional, obteniendo su relación de dependencia. Para obtener este voltaje operacional se ha utilizado un electrómetro KEITHLEY, modelo 6517B, el cual presenta una resolución inferior al mV, más que suficiente en nuestro caso ya que se necesitan mayores variaciones para modificar apreciablemente la ganancia.
3. Finalmente, a partir de estas dos dependencias determinadas, se ha obtenido la ecuación de dependencia entre voltaje operacional y temperatura correspondiente a una ganancia constante, y se ha realizado un test de comprobación de esta relación.

El objetivo final de este estudio será mantener la ganancia del fotomultiplicador de silicio constante ante variaciones involuntarias de la temperatura mediante variaciones controladas del voltaje operacional. Esta es una corrección fundamental para el objetivo final del detector, ya que, de lo contrario, obtendríamos alertas de fugas de tritio cuando estas no han ocurrido, y viceversa, cuando, en realidad, lo único que ha ocurrido ha sido una modificación de temperatura del detector.

3.1. Equipo y montaje experimental

Para llevar a cabo esta caracterización de los SiPM se ha necesitado de la instrumentación que se especifica a continuación:

1. En primer lugar se necesitaba una **cámara de control de temperatura**.

Dado que la cámara existente en el laboratorio del IFIC no estaba configurada, tuvo que utilizarse la cámara que se encontraba en el IFIMED. Esta cámara (marca DYCOMETAL, modelo CCM 81) se presenta en la figura 9 izquierda. Este sistema dispone de un panel de control con el que se puede especificar la temperatura y humedad a la que queremos trabajar en el interior de la cámara. Sin embargo, para asegurar el correcto funcionamiento de la cámara, debíamos trabajar siempre en la zona 1 de acuerdo al diagrama de estados en la ficha técnica de la cámara, mostrado en la figura 9 derecha. Posee un interior metálico que permite una rápida estabilización ante posibles cambios de las condiciones en su interior y, además, actúa a modo de jaula de Faraday.

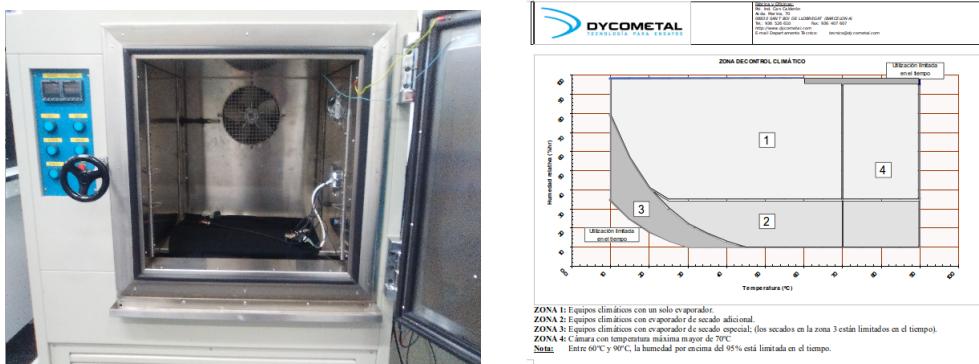


Figura 9 – Sistema de control de temperatura y diagrama de estados [27]

La incertidumbre del punto de trabajo es $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura y $0,5\%$ para la humedad relativa. Estas incertidumbres se determinaron observando la oscilación máxima en la pantalla del panel de ambos parámetros tras llegar a la estabilidad en el interior de la cámara. En el interior de esta cámara se encontraba nuestra fuente de luz que proporcionaba la señal de entrada del sistema que pretendíamos medir con el SiPM, el propio SiPM, la tarjeta de conversión intensidad-voltaje y cableado que hacía posible la interacción con estos dispositivos. Además, hay que tener en cuenta que esta cámara no actuaba como caja negra, por lo que para conseguir reducir la posible entrada de luz del exterior se taparon todas las posibles fisuras del sistema con cinta metálica y, además, se cubrió el dispositivo con una tela negra especial. Con todo esto, conseguimos reducir el fondo del sistema hasta un nivel adecuado.

2. En segundo lugar necesitamos instrumentos nos permitiesen alimentar tanto el SiPM como la tarjeta de conversión intensidad-voltaje. Se utilizó un **electrómetro** (marca KEITHLEY, modelo 6517B) para alimentar el SiPM y un **generador de tensión** (marca ISO-TECH, modelo IPS-4303) para alimentar la tarjeta de conversión.

Se utilizó el electrómetro para el SiPM, ya que este dispone de un abanico de voltajes mayor, necesario para alimentar al SiPM. Por el contrario, el ISO-TECH sólo dispone de una

tensión máxima de 30 V, insuficiente para alimentar al SiPM pero suficiente para alimentar la tarjeta. Poseen una resolución inferior al milivoltio e inferior a 0,1 V respectivamente, suficiente para que las ganancias que dependen del voltaje (ganancia del SiPM y de la tarjeta respectivamente) no varíe cuando fijamos el voltaje.

3. En tercer lugar, se necesitaba una **fuente** que simulase la emisión de los fotones de la fibra centelleadora.

Se utilizó un **diodo LED** (de la empresa Roithner Laser technik) que emite fotones de una longitud de onda de 435 nm [28], en la zona del azul. Esta es la longitud de onda que necesitamos en nuestro experimento para calibrar el SiPM, ya que corresponde a la longitud de onda a la cual el espectro de emisión de las fibras centelleadoras BCF-12 tiene su máximo.

4. En cuarto lugar, para alimentar este diodo LED, se necesitó un **generador de pulsos** (marca Agilent, modelo 33250A). Este generador de señales nos permite especificar la forma del pulso que pretendemos proporcionar y sus características. Este tenía que ser capaz de formar un pulso suficientemente estrecho para que el SiPM detectase unos pocos fotones.

En concreto alimentaremos el diodo LED con un pulso cuadrado. Los parámetros que nos permite especificar el generador de señales para un pulso de esta forma son frecuencia (o período), high level (o amplitud), low level, offset, anchura del pulso y tiempo de atenuación. Para nuestro estudio, los valores de estos parámetros que nos daban un mejor resultado desde el punto de vista experimental fueron una frecuencia de 20 Hz, high level de 2,275 V, low level de 1 V, offset de 1,638 V_{dc} , anchura del pulso de 12 ns y tiempo de atenuación de 5 ns. Este generador de señal nos proporciona una segunda señal, denominada señal de sincronización, la cual podemos utilizar como trigger para determinar el instante de tiempo en el que se activa la señal.

5. En quinto lugar, utilizamos un **SiPM** para detectar los fotones emitidos por el LED. En concreto, se utilizó el modelo S13360-1375CS de Hamamatsu Photonics, que es un fotomultiplicador cerámico de silicio que presenta una ganancia teórica de $G = 4 \cdot 10^6$ y una eficiencia de fotodetección teórica del 50 % a 25 °C y $V_{ov} = V_{op} - V_{bd} = 3$ V. Su campo espectral es de [270 – 900]nm [24]. Este SiPM compuesto por un total de 285 pixels de 75 μm cada uno dando lugar a una superficie total activa de $1,3 \times 1,3 \text{ mm}^2$ frente a su superficie total que es de $6 \times 5 \text{ mm}^2$. Puede verse reflejado en la figura 10 izquierda [24].
6. Hay que tener en cuenta que el SiPM nos proporciona un pulso de intensidad a la salida y necesitamos convertir este en un pulso de voltaje para, de esta forma, poder introducirla al osciloscopio para realizar el posterior análisis. Para ello emplearemos en sexto lugar una **tarjeta conversora** de intensidad en voltaje que puede verse reflejada en la figura 10 derecha, en la cual se encuentra el SiPM utilizado conectado a la misma.

Esta es una tarjeta desarrollada en el marco del proyecto NEXT. Esta consiste de dos entradas donde podemos conectar dos SiPM distintos. La tarjeta contiene el circuito de la figura 11 para cada SiPM:

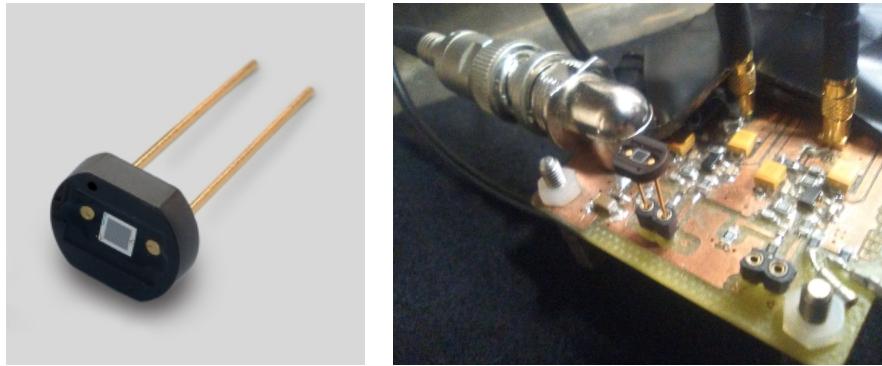


Figura 10 – SiPMs y tarjeta de conversora intensidad-voltaje

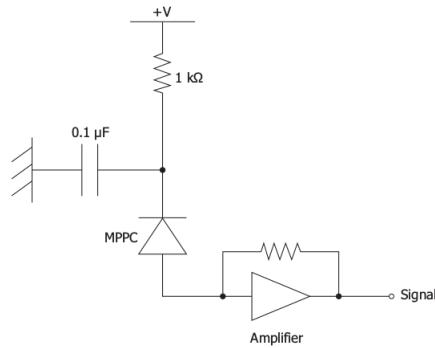


Figura 11 – Circuito de una tarjeta tipo [24]

La tarjeta tiene una ganancia de $G = 170$. Este será el valor que utilizaremos en el análisis posterior para calcular la ganancia de los SiPM.

7. Seguidamente se observó que, únicamente alimentando la tarjeta, antes de alimentar el SiPM y la led, obteníamos una perturbación externa a nuestro experimento. Esta se presenta en la figura 12.



Figura 12 – Ruido electrónico

Se intentó caracterizar esta señal de perturbación, ajena a nuestro experimento y, a priori, de origen desconocido. Tenía una amplitud máxima de 4 mV y una frecuencia bastante irregular entorno al MHz. Finalmente se vio que era debido por una parte a la emisión producida por las antenas de Radiotelevisión Valenciana y, por otra parte, de los distintos instrumentos electrónicos conectados a la red eléctrica del IFIC, ya que esta posee una toma a tierra bastante irregular. Con la presencia de este ruido no podíamos realizar medidas

ya que introducía una componente de ruido tal que estropeaba por completo el resultado de la medida. Con el fin de solucionar este problema se dispuso de un **filtro pasa banda** (GUARD LCD2 650 AP) para eliminar este ruido.

8. Finalmente, como se ha mencionado anteriormente, necesitamos una **manta negra** especial que apantallase la entrada de fotones del exterior, ya que el sistema de control de temperatura no actuaba como caja negra.

Una alternativa podría haber sido introducir una caja negra en el interior del sistema de control de temperatura y introducir el diodo Led, el SiPM y la tarjeta en su interior. Sin embargo de esta forma no conseguimos un control de la temperatura y humedad en su interior.

3.2. Análisis de datos

En resumen, en nuestra prueba de calibración de los SiPM tenemos una caja que actuará como jaula de Faraday, con temperatura y humedad controlada y apantallada en lo posible de la luz del exterior.

En su interior colocamos un diodo LED que emite fotones de $\lambda = 435$ nm, un SiPM, que emite un impulso de intensidad cada vez que detecte uno o más fotones y una tarjeta que convierte este impulso de intensidad en un impulso de voltaje. Finalmente llevamos este impulso de voltaje a un osciloscopio (marca TELEDYNE LECROY, modelo WwaveRunner 625Zi) que lo analiza. Una vez en el osciloscopio, la señal que recibimos cuando se enciende el diodo LED es similar a la de la señal superior de la figura 13 (amarilla) [29]. Para el análisis, se activa el modo persistencia del osciloscopio con el objetivo de comparar señales de distintas alturas. Estas señales corresponden a distinto número de pixels activados en cada instante de tiempo ya que, como hemos dicho anteriormente, la señal de salida del sistema es la suma de las señales de los pixeles activados. La señal se muestra superpuesta a la señal de sincronización del generador de señales (verde) que nos muestra cuando se ha encendido el diodo LED y que, por tanto, actúa como trigger.

El objetivo ahora es calcular la ganancia del sistema. Dado que únicamente existen dos ganancias en el sistema (SiPM y tarjeta) y conocemos la ganancia de la tarjeta, mencionada en la sección anterior, determinando la ganancia total podremos determinar de forma aproximada la ganancia del SiPM.

$$G_{tot} = G_{SiPM} \cdot G_{card} \longrightarrow G_{SiPM} = \frac{G_{tot}}{G_{card}} \quad (7)$$

Para medir la ganancia total realizamos una integral del área de cada uno de los impulsos de salida del sistema y guardamos el resultado en un histograma. De esta forma, obtenemos un histograma de las cargas de los pulsos. La ventana temporal sobre la que se integra es aproximadamente una división, que equivale a 500 ns. Esta se ajusta con bastante precisión al impulso, algo muy importante para evitar la introducción de fondo.

Dado que idealmente el impulso producido por los pixel son idénticos, el histograma obtenido debería ser un conjunto deltas de Dirac equiespaciadas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la cascada que produce cada uno de estos fotones detectados en cada pixel esta sometido a fluctuaciones estadísticas. Además, los propios instrumentos de medidas empleados tienen una incertidumbre inherente. Hay que tener en cuenta que también tenemos distintas fuentes de fondo, como la corriente oscura (ruido térmico), fotones de luz del exterior, etc. Como resultado de todo esto, lo que obtenemos un conjunto de gaussianas equiespaciadas. En la figura 13 inferior puede verse el resultado de una toma de datos de 25000 eventos a 25 °C, 60 % de humedad y $V_{ov} = 3$ V,

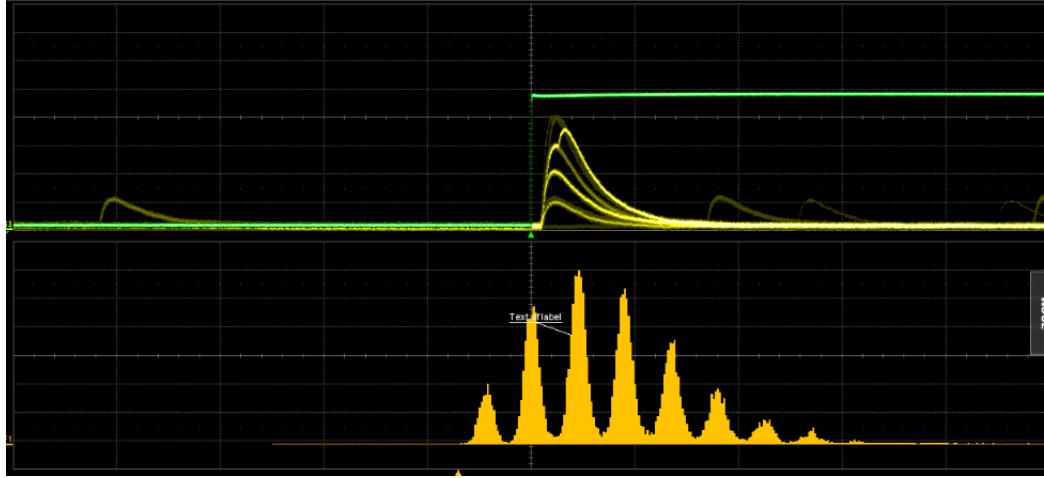


Figura 13 – Análisis

donde cada uno de los picos corresponde a la carga de un número de pixels activados (uno, dos, etc.). El primer pico no debe tenerse en cuenta en el análisis, ya que este corresponde al pedestal (cero pixels activados). Su origen es debido a la existencia de las cuentas oscuras.

Hemos desarrollado una macro en ROOT [30] que, utilizando la librería TSpectrum (especialmente diseñada para el análisis de histogramas con picos) para obtener la ganancia del sistema. Su diagrama de flujo es el siguiente:

1. Primero la macro lee el fichero de datos, los guarda en una variable de tipo histograma y los representa. La macro termina de leer el fichero cuando no encuentra más valores.
2. A continuación, a partir de una función de la librería TSpectrum, busca en este histograma y devuelve el número de gaussianas que ha encontrado y su posición.
3. Seguidamente ajusta todos los datos del histograma a una recta y solo se queda con las gaussianas, cuya norma sobrepasa en altura a esta recta. El objetivo de este paso es que, en casos muy concretos (temperatura alta o luz del laboratorio encendida) tenemos mucho ruido y, aparece un fondo, que el programa ajusta a una gausiana y, como consecuencia calcula la ganancia de manera incorrecta. Un ejemplo de este caso se muestra en la figura 14.
4. A continuación, ajustamos el espectro a una recta más una suma de n gaussianas, donde n es el número de gaussianas que superan la recta (calculado en el paso anterior). La necesidad de utilizar una recta es debido a que siempre vamos a tener corriente oscura y otro tipo de



Figura 14 – Espectro con mucho fondo

fondo que aparecen como una linea base en el histograma, como puede verse en la figura 13. Podemos apreciar en la figura 15 que el ajuste (linea roja) es relativamente bueno. Para determinar si ajuste es aceptable aplicamos el test χ^2 . En este caso se obtuvo un resultado de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{1276}{223} \approx 5,72$. Vemos que efectivamente, el ajuste lineal representa bien los datos.

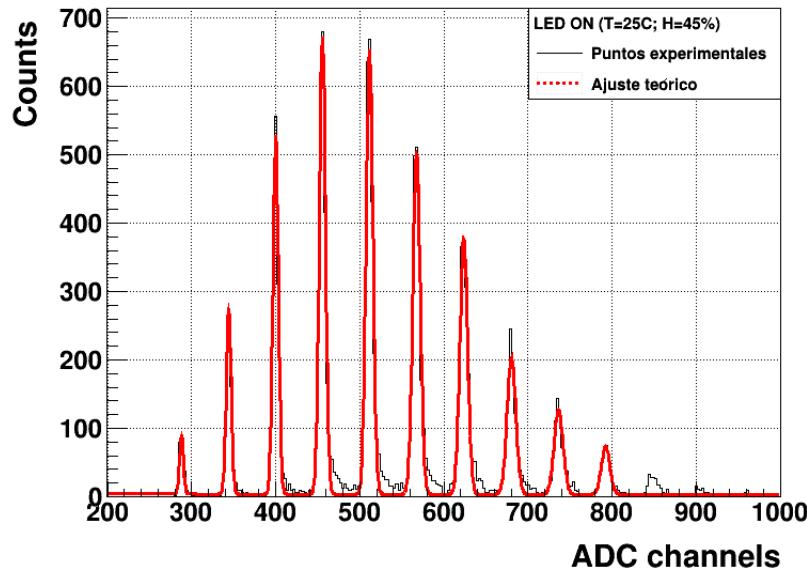


Figura 15 – Ajuste de un espectro con la macro de ROOT

5. Dado que se ha observado que, aun con el tercer paso, existen situaciones límites en que el fondo sigue superando la recta, se ha incluido un paso en la macro en la cual se acepta por teclado uno a uno los picos que serán utilizados en el análisis. Además, la macro calcula la resolución de cada gaussiana y la resolución total, obtenida a partir de la suma cuadrática de la resolución de cada gaussiana. Los valores habitualmente encontrados en los análisis se encuentran en el intervalo 1,5 % – 5 %, valores bastante aceptables.
6. Finalmente, la macro ordena los picos según su posición en el espectro y calcula la ganancia por dos caminos:
 - a) Por un lado se ha calculado la distancia promedio entre sucesivas gausianas del espec-

tro [32].

$$Q = GN_\gamma + Q_0 \longrightarrow \Delta Q = Q_{N_\gamma} - Q_{N_\gamma-1} = GN_\gamma + Q_0 - G(N_\gamma - 1) - Q_0 = G \quad (8)$$

Podemos observar que este cálculo corresponde a la ganancia. Hay que tener en cuenta que se han empleado factores de conversión para convertir la posición del pico (initialmente en unidades de tensión V) en unidades de carga C. En concreto, se ha utilizado el factor $\frac{1}{eR}$, donde R es la resistencia del osciloscopio, 50Ω y e es la carga del electrón.

- b) Por otro lado, se ha ajustado a una recta las posiciones horizontales de estas gausianas en el espectro frente a el número de píxeles. Esto nos da la siguiente ecuación [32]:

$$\text{Centro_pico}(V) = GeRN_\gamma + k_0 \quad (9)$$

Vemos por tanto, que a partir del valor de la pendiente podemos obtener el valor de la ganancia. La figura 16 muestra un ejemplo de ajuste de posiciones de gausianas y número de píxeles para el caso de 25°C , humedad de 45% y $V_{ov} = 3$ V. Podemos observar que existe un acuerdo excelente, algo que ocurre prácticamente en la totalidad de los casos. Las barras de error de este gráfico no son apreciables en esta escala.

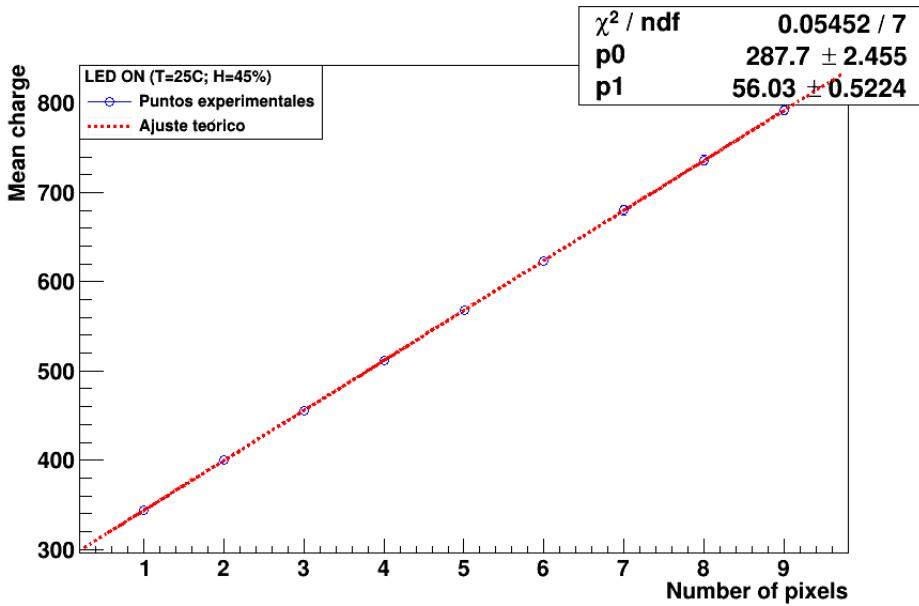


Figura 16 – Ajuste carga de las señales del SiPM frente al número de píxeles encendidos

Para este caso concreto las ganancias obtenidas por los dos caminos anteriores son respectivamente:

$$G_1 = (6,4 \pm 2,2) \cdot 10^8 \quad (10)$$

$$G_2 = (718,2 \pm 6,9) \cdot 10^6 \quad (11)$$

Por extensión, las ganancias del SiPM calculadas por cada camino son (aproximadamente)(7):

$$G_1 = (3,8 \pm 1,3) \cdot 10^6 \quad (12)$$

$$G_2 = (422,5 \pm 4,1) \cdot 10^4 \quad (13)$$

donde los errores se han obtenido por propagación. Si comparamos con la bibliografía [24] podemos observar que ambos valores son bastante aceptables, con errores relativos de:

$$\sigma_{rel1} \approx 0,05 = 5\%; \quad \sigma_{rel2} \approx 0,056 = 5,6\% \quad (14)$$

Dado que, en la práctica, las gausianas no están perfectamente equiespaciadas debido a errores e incertidumbres, consideraremos como más fiable el segundo método, ya que se trata de un método más formal, a pesar de tener un error relativo mayor. El test χ^2 da un valor de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{0,05452}{7} \approx 0,008$, bastante inferior a la unidad, debido probablemente a que se han sobreestimado los errores de las medidas (calculados a partir de las desviaciones típicas de las gausianas del ajuste de la figura 15).

3.3. Calibración en temperatura

Una vez calculada la ganancia del SiPM a partir de los datos, procedemos a determinar la dependencia del SiPM con la temperatura. En concreto, nos interesa determinar el comportamiento de su ganancia cuando varía la temperatura. Para ello realizamos una serie de medidas a distintas temperaturas y, para cada una de ellas, calculamos la ganancia a partir del método expuesto en el apartado anterior.

Nos centraremos en el intervalo de temperatura entre 15 °C, que es el mínimo al que nos permitía llegar el sistema de control de temperatura y 41 °C, que, suponemos, es el límite al que llegará nuestro futuro detector en la práctica. Es decir, este intervalo de temperaturas es equivalente a las temperaturas a las que estará sometido nuestro detector debido a las condiciones climáticas del lugar. Realizaremos pasos de 2 °C entre cada medida realizando un total de 14 medidas. Realizaremos medidas de 15000 eventos que son suficientes para obtener un espectro suave.

Para automatizar este proceso, hemos desarrollado una macro en ROOT que realice este ajuste. Esta macro se divide en dos partes:

- Por un lado, posee un bucle en el que, en cada paso, abre el fichero correspondiente a una temperatura, empezando por la mínima (15 °C) realiza todo el estudio anterior y guarda ganancia y temperatura con sus errores en 4 vectores respectivamente. En cada paso aumenta 2 °C la temperatura y pasa a leer el siguiente fichero. Hay que tener en cuenta que, como se dijo anteriormente, el sistema de control de temperatura debe de estar en la zona uno del diagrama de fases existente en la ficha técnica. Esto implica que, para medidas inferiores a 27 °C necesitamos aumentar la humedad en un 5% en cada medida (humedad del 45% para 25 °C, 50% para 23 °C, etc.). Esto no tiene mayor importancia, ya que se vio que la ganancia del SiPM no se ve afectada de forma apreciable ante modificaciones de la humedad de este tamaño. La incertidumbre en la temperatura viene dada por la oscilación en el valor de la temperatura observada directamente en el panel de control del sistema. La oscilación observada fue en todo momento de 0,1 °C, una incertidumbre totalmente

inapreciable tanto a nivel visual en la gráfica como a nivel de variación de la ganancia.

- Por otro lado, partiendo de estos 4 vectores de dimensión 14 en nuestro caso (igual al número de ficheros que ha leido) que contienen ganancia, temperatura y sus errores de forma ordenada la macro realiza un ajuste lineal. El ajuste obtenido se presenta en la figura 17.

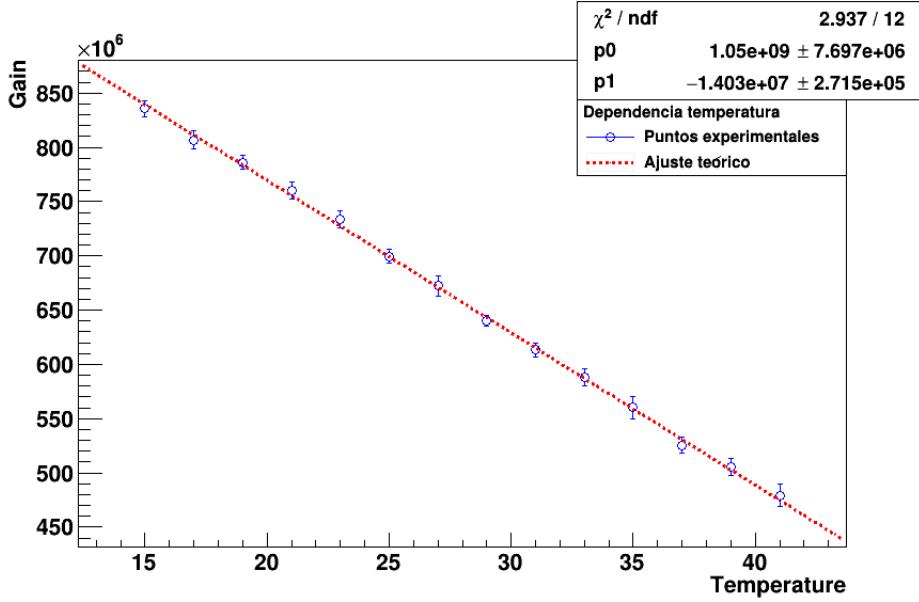


Figura 17 – Ganancia frente a temperatura

Podemos observar la existencia de un comportamiento lineal casi perfecto en un intervalo de temperatura de 26 °C. Esta es una propiedad que caracteriza al SiPM, una muy buena linealidad en su comportamiento frente a modificaciones en varias magnitudes. Nuevamente comprobamos la calidad del ajuste a partir del test χ^2 obteniendo un valor de $\frac{\chi^2}{\text{ndf}} = \frac{2,937}{12} \approx 0,245$, que es un valor relativamente bueno.

En la gráfica 17 encontramos, como esperábamos [25], la existencia de un decrecimiento del valor de la ganancia del SiPM a medida que aumenta la temperatura. Esto es debido a que la zona desierta, que se crea en el SiPM al aplicar un voltaje en inversa y que actúa como zona útil de detección de radiación, depende de la temperatura. En concreto, al aumentar la temperatura estamos incrementando la excitación térmica de los portadores de carga pudiendo, de esta forma, invadir esta zona desierta, reduciéndola su tamaño y, por extensión, la ganancia del SiPM.

La ecuación obtenida en este ajuste $G = aT + b$ toma los siguientes valores:

$$a = (-140,3 \pm 2,7) \cdot 10^5 \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (15)$$

$$b = (1050,0 \pm 7,7) \cdot 10^6 \quad (16)$$

Esta es un resultado importante, no por el valor numérico, sino porque será la base que utilizaremos para conseguir la compensación de la ganancia.

3.4. Calibración en voltaje de operación

De forma totalmente análoga procedemos a determinar el comportamiento del SiPM, en concreto de su ganancia, frente al voltaje operacional. Para ello, realizaremos una serie de medidas a distintos voltajes operacionales y, para cada uno de ellos, calcularemos la ganancia mediante el método expuesto anteriormente.

Nos centraremos en el rango de voltajes entre el voltaje de ruptura, $V_{BD} = 50,97$ V, que es el mínimo voltaje en valor absoluto a partir del cual nos encontramos en modo Geiger y $V_{BD} + 5$ V, que es un intervalo suficiente para compensar la ganancia en el intervalo de temperaturas que hemos medido. Realizaremos pasos de 0,2 V entre cada medida realizando un total de 25 medidas. De nuevo, únicamente realizaremos medidas de 15000 eventos, suficiente para obtener un espectro suave.

Para automatizar este proceso procedemos a desarrollar una macro en ROOT que realice este ajuste. Análogamente esta macro poseerá dos partes:

- Por un lado posee un bucle en el que, en cada paso, abre el fichero correspondiente a un voltaje operacional, empezando por el mínimo ($V_{op} = V_{BD}$) realiza todo el estudio anterior y guarda ganancia y voltaje operacional con sus errores en 4 vectores respectivamente. En cada paso aumenta 0,2 V el voltaje operacional y pasa a leer el siguiente fichero. En este estudio, a diferencia del estudio de la temperatura, la incertidumbre en el voltaje viene dada por la precisión del electrómetro (del orden de 1 mV) ya que el valor era perfectamente estable. Esta incertidumbre es totalmente inapreciable tanto a nivel visual en la gráfica como a nivel de variación de la ganancia. Hay que tener en cuenta que el voltaje operacional posee un error relativo, definido como $\frac{\sigma_x}{x}$ muy inferior al de la temperatura, siendo estos aproximadamente $1 \cdot 10^{-5}$ y $8 \cdot 10^{-3}$ respectivamente. Es decir, las medidas tomadas en este estudio serán más precisas.
- Por otro lado, partiendo de estos 4 vectores de dimensión 25 en nuestro caso (igual al número de ficheros que ha leído) que contienen ganancia, temperatura y sus errores de forma ordenada, realiza un ajuste lineal. El ajuste obtenido se presenta en la figura 18.

Podemos apreciar de nuevo, como esperábamos [25], la existencia de un comportamiento lineal casi perfecto en un intervalo de voltaje de 5 V. Vemos de nuevo reflejada la propiedad de buena linealidad que caracteriza a los SiPM. En la gráfica podemos notar la existencia de un mayor error en las medidas de voltajes mas bajos (en valor absoluto). Esto es debido a que nos estamos acercando al voltaje ruptura, donde el silicio entra en modo Geiger y el valor de la ganancia empieza a ser distinto de cero. Podemos achacar este mayor error a que a estos voltajes, cercanos a la frontera de cambio de comportamiento, el SiPM todavía no funciona de forma adecuada, pues no funciona todavía en modo Geiger. Hay que tener en cuenta además que sólo se llegó hasta el voltaje $V_{op} = 51,57$ V debido a que, cuando estamos a valores muy cercanos al voltaje de ruptura, la ganancia sufre una disminución exponencial, siendo imposible realizar su medida.

De nuevo comprobamos la calidad del ajuste a partir del test χ^2 , obteniendo un valor de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{7,963}{21} \approx 0,379$, el cual se trata de un valor relativamente bueno.

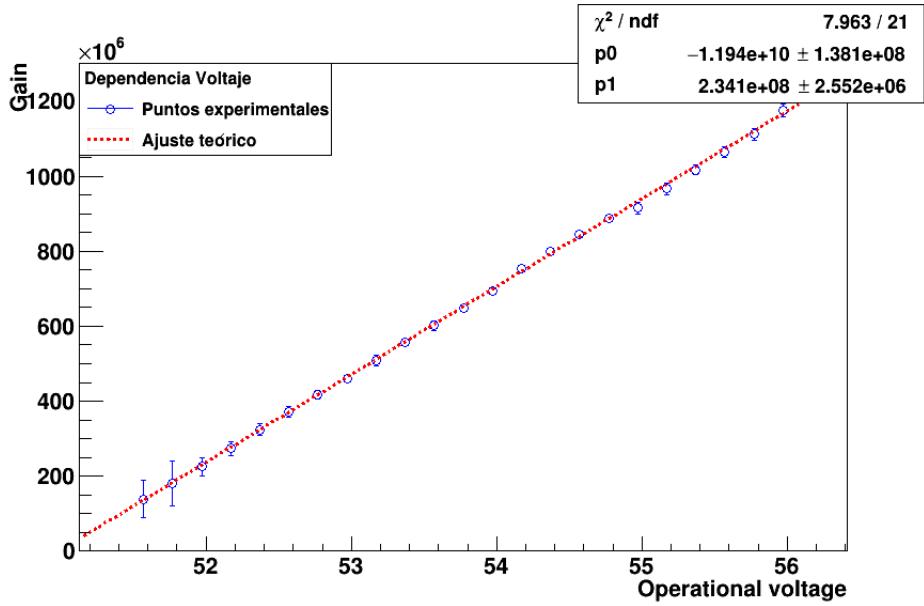


Figura 18 – Ganancia frente a voltaje operacional

Podemos observar que, al contrario de lo que ocurría con la temperatura, el valor de la ganancia del SiPM aumenta a medida que aumenta el voltaje operacional. Esto es debido a que a medida que aumentamos el voltaje operacional, aumenta la diferencia de potencial en la zona desierta. De esta forma, por un lado, aumentando la zona desierta, por lo que los pares electrón-hueco dispondrán de mayor espacio para generar una avalancha mayor y, por otro lado, estamos aplicando una mayor tensión sobre los pares electrón-hueco generados al detectar radiación que, en consecuencia, sufrirán una mayor aceleración. Debido a ello, dispondrán de una mayor energía para producir un mayor número de pares electrón-hueco. En resumen ambos procesos contribuyen a aumentar la ganancia del SiPM.

La ecuación obtenida en este ajuste $G = cV_{op} + d$ toma los siguientes valores:

$$c = (234,1 \pm 2,6) \cdot 10^6 \text{ V}^{-1} \quad (17)$$

$$d = (-119,4 \pm 1,4) \cdot 10^8 \quad (18)$$

Remarquemos de nuevo la importancia de este resultado, ya que es la parte que nos faltaba para poder calcular la compensación de la ganancia. Además, a modo de comprobación, podemos obtener el voltaje de ruptura a partir de esta expresión, que corresponde al voltaje al cual la ganancia es cero (voltaje a partir del cual estamos en modo Geiger y la ganancia empieza a ser no nula). El voltaje calculado es:

$$G = 0 = c \cdot V_{BD} + d \rightarrow V_{BD} = -\frac{d}{c} = 50,99 \pm 0,81 \text{ V} \quad (19)$$

Vemos que este se acerca de forma extraordinaria al voltaje teórico especificado por Hamamatsu Photonics, 50,97 V.

3.5. Estabilización de la ganancia

Finalmente, con toda la información obtenida en los apartados anteriores, procedemos a desarrollar un protocolo de compensación de la ganancia. Nuestro objetivo es que, ante una modificación de la ganancia debida a una variación involuntaria de la temperatura (por ejemplo debido a variaciones climatológicas) aplicar una variación adecuada en el voltaje operacional que devuelva a la ganancia a su valor inicial.

Como ya se ha explicado anteriormente, la importancia de este estudio de compensación radica en que deseamos utilizar el detector a modo de alarma. Dado que este estará expuesto a condiciones climáticas arbitrarias, inevitablemente sufrirá variaciones de temperatura. Si queremos que el detector final sea capaz de avisar en caso de obtener una señal demasiado grande y que esta señal se corresponda a una fuga de tritio, necesitamos que el sistema posea una ganancia constante.

Las expresiones que se han obtenido con las dos calibraciones anteriores son:

$$G(V_{op}) = cV_{op} + d; \quad G(T) = aT + b \quad (20)$$

Esto implica que una variación de la ganancia en cada una de estas magnitudes viene reflejado como:

$$\partial G(V_{op}) = c\partial V_{op}; \quad \partial G(T) = a\partial T \quad (21)$$

Finalmente, la variación total de la ganancia ante una variación de ambas magnitudes viene dada por:

$$\partial G_{tot} = \partial G(V_{op}) + \partial G(T) \quad (22)$$

Por tanto, si queremos que el valor de la ganancia se conserve ante una variación de ambas magnitudes, tenemos que conseguir que:

$$\partial G_{tot} = 0 = \partial G(V_{op}) + \partial G(T) \longrightarrow \partial G(V_{op}) = -\partial G(T) \quad (23)$$

En otras palabras, debemos producir una variación opuesta de la ganancia con la modificación del voltaje a la que se ha producido al variar la temperatura. Para determinar esta variación, únicamente sustituimos las expresiones anteriormente obtenidas para cada diferencial de la ganancia:

$$\partial G(V_{op}) = -\partial G(T) \longrightarrow c\partial V_{op} = -a\partial T \longrightarrow \partial V_{op} = -\frac{a}{c}\partial T \quad (24)$$

En trabajos anteriores[22, 25, 26] se ha visto que ambas pendientes, a y c , apenas varían en voltaje y temperatura. Por tanto, en primera aproximación, podemos considerarlas constantes en ambas magnitudes. Con ello integramos a cada lado y obtenemos:

$$\int_{V_i}^{V_f} \partial V_{op} = -\frac{a}{c} \int_{T_i}^{T_f} \partial T = -\frac{a}{c} \Delta T \longrightarrow \Delta V_{op} = e\Delta T \quad (25)$$

donde se ha introducido un nuevo parámetro:

$$e = -\frac{a}{c}$$

cuyo valor se obtiene de las ecuaciones (15) y (17):

$$c = (234,1 \pm 2,6) \cdot 10^6 \text{ V}^{-1} \quad (26)$$

$$a = (-140,3 \pm 2,7) \cdot 10^5 \frac{1}{\text{°C}} \quad (27)$$

$$e = -\frac{a}{c} = (59,9 \pm 1,3) \cdot 10^{-3} \text{ V°C}^{-1} \quad (28)$$

donde el error de e se ha obtenido mediante propagación de errores.

Finalmente, procedemos a analizar el resultado. Hemos obtenido dos dependencias de la ganancia lineales y opuestas. Por un lado la ganancia disminuye con la temperatura y por otro lado la ganancia aumenta con el voltaje operacional. Por tanto, si queremos conseguir modificaciones opuestas de la ganancia debemos desplazar voltaje y temperatura en la misma dirección (aumentar o disminuir ambas magnitudes simultáneamente). Si analizamos el resultado vemos que, efectivamente, tenemos una dependencia positiva. También apreciamos que obtenemos un valor dos órdenes de magnitud inferior a la unidad. Esto es debido a que la dependencia de la ganancia con el voltaje es mucho más marcada que la variación con la temperatura (mayor pendiente en valor absoluto para el ajuste del voltaje que para el ajuste de la temperatura). Este es el motivo por el que se toma pasos más reducidos para el voltaje que para la temperatura.

En resumen, la ecuación que nos dicta cual es la variación que debemos aplicar al voltaje para mantener un valor de ganancia constante (compensar la ganancia) ante una variación de la temperatura conocida (que puede ser medida con un sensor de temperatura) es:

$$\Delta V_{op} = 0,059929 \cdot \Delta T \longrightarrow V_1 - V_{ref} = 0,059929(T_1 - T_{ref}) \quad (29)$$

Donde V_1 es el voltaje con el que hay que alimentar al SiPM a una temperatura ambiental de T_1 para mantener la ganancia constante. Para realizar este cálculo, se necesita tomar un valor de voltaje operacional y temperatura como referencia, cuya ganancia es la que mantendremos. Para estos valores de referencia elegiremos el caso anteriormente mostrado en la sección de análisis de datos correspondiente a temperatura 25 °C, humedad del 45 % y voltaje operacional de 53,97 V = $V_{BD} + 3$ V, cuya ganancia hemos visto que corresponde a $7,18235 \cdot 10^8$. Por tanto, el valor de voltaje operacional V_1 con el que hay que alimentar un SiPM a temperatura T_1 , para mantener una ganancia de $7,18235 \cdot 10^8$ es:

$$V_1 = 0,059929T_1 + 52,47 \quad (30)$$

Procedemos a realizar una verificación midiendo los casos de 21, 23, 25, 27 y 29 °C. En cada uno de ellos se corregirá el voltaje de alimentación de forma adecuada para mantener el mismo valor de la ganancia. El valor de la ganancia para cada caso se muestra en la figura 19.

donde la raya roja corresponde al ajuste a una constante. Su valor, correspondiente al

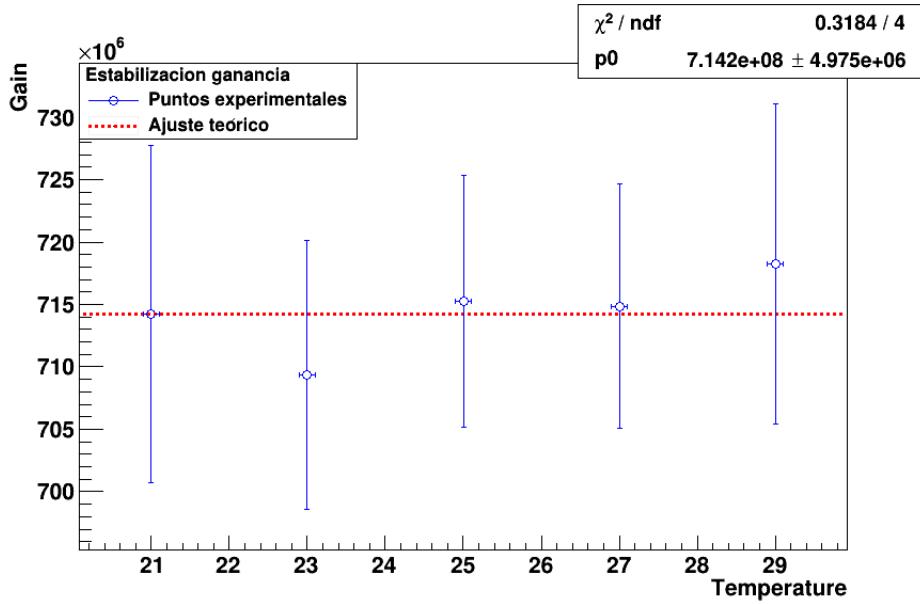


Figura 19 – Verificación del método de compensación

valor de la ganancia es $G = (714,2 \pm 4,9) \cdot 10^6$. Comprobamos la calidad del ajuste a partir del test χ^2 obteniendo un valor de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{0,318}{4} \approx 0,0795$, valor ligeramente bajo, probablemente debido a una sobreestimación de los errores (algo que ya puede apreciarse en la imagen).

Vemos que el método funciona de manera muy eficaz, ya que la ganancia presenta variaciones muy pequeñas de aproximadamente $\Delta G = 5 \cdot 10^6$, que corresponde a una variación relativa de $\sigma_{rel} = 2,801 \cdot 10^{-3}$. Hemos comprobado por tanto que se trata de un método realmente eficaz.

La máxima variación se observó a 23 °C, debido a que fue una medida realizada muchas horas después de tomarse las otras y existen factores externos que no podemos controlar que afectan al sistema. En este tiempo más largo transcurrido es más probable que hayan cambiado estos factores. Sin embargo, puede observarse en todo momento que la variación de la ganancia es mínima verificando en gran medida la ecuación anteriormente obtenida.

4. Prototipo

Finalmente, con cada una de las partes convenientemente preparadas y calibradas, procedemos a realizar el estudio sobre una configuración preliminar del proyecto *Tritium*. Para ello, en primer lugar, se realizará una descripción del prototipo y de la puesta a punto del mismo. En segundo lugar, se presentarán los resultados obtenidos.

4.1. Configuración del prototipo

En primer lugar, se tuvo que diseñar y construir un prototipo que respondiese a una serie de exigencias impuestas por el experimento. Por un lado, debía de ser capaz de albergar de manera

segura un haz de 35 fibras centelleadoras, el cual se encontraría totalmente sumergido en una solución de agua tritiada estanca. Este prototipo debía de ser capaz de comunicar los extremos del haz con fotosensores, los cuales deben estar aislados del agua tritiada, sin que exista ningún tipo de fisura, para asegurar que no existe peligro de fuga y, por tanto, de contaminación, ni siquiera por evaporación del agua. Por otro lado, debía de sostener de forma segura los fotosensores utilizados, en nuestro caso PMTs, para leer la señal producida por las fibras centelleadoras.

Con todas estas exigencias, el material elegido para la construcción del prototipo fueron diversos elementos de fontanería de PVC. El motivo de esta elección es su seguridad, ya que están especialmente diseñados para transportar agua, su facilidad de manipulación, ya que podemos realizar cortes con facilidad, además de existir muchas formas disponibles en el mercado y, finalmente, su precio, ya que se trata de un material bastante económico. En concreto, se adquirió un tubo de PVC de 2 m de longitud y un diámetro interior de 15 mm, en el cual se practicaron una serie de cortes, dando lugar a un conjunto de secciones que conformarían los 2 prototipos. Para unir cada una de estas secciones y dar forma al prototipo, se utilizaron codos, típicamente utilizados en fontanería de PVC, cuyas uniones serían finalmente selladas mediante soldadura química. Finalmente, el prototipo quedó sujeto de forma segura sobre una estructura de metacrilato y acero, fabricada en el taller de mecánica del IFIC. El aspecto final del prototipo se muestra en la figura 20. Este prototipo tiene un volumen interior que permite rellenarlo con

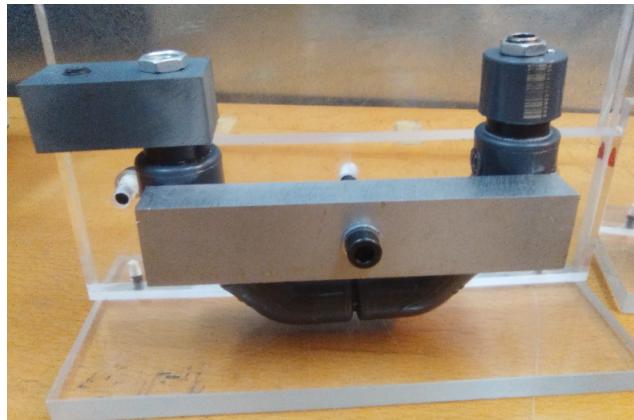


Figura 20 – Prototipo

39 cm³ de solución radiactiva, el cual se calculó y verificó mediante varios ensayos de llenado con agua destilada. También se verificó la estanqueidad del prototipo mediante ensayos de 2 días.

Se decidió realizar un prototipo con forma de U. Dado que el prototipo no se trasladará en ningún caso y, teniendo en cuenta que se verificó su estanqueidad, personalmente opino que esta es la forma más segura y que mejor se adapta a las exigencias del prototipo. Las dos aberturas superiores se cerraron y sellaron con tapones, unos utilizados en fontanería de PVC y otros fabricados para este prototipo en los talleres mecánicos del IFIC. Se eligieron tapones diferentes para cada extremo. Un primer tapón circular, correspondiente al tubo de PVC y un segundo tapón cuadrado, diseñado para facilitar el proceso de llenado. Este segundo tapón dispone de un orificio de 8 mm por el que se realizó el proceso de llenado mediante una pipeta. Al primer tapón se le ha practicado un orificio de 1 mm para purgar el aire durante el proceso de llenado. Finalmente, estos orificios se cerraron con tornillos de rosca envueltos en teflón, y finalmente se sellaron con silicona. Estos tapones se muestran en la figura 21. Además, a ambos tapones se les

ha practicado un agujero de 9,8 mm de diámetro, tamaño justo para que por cada uno de éstos pase un extremo del haz de fibras centelleadoras. En cada extremo se dispusieron dos arandelas, roscadas al aro que conformaba el extremo del haz de fibras, según se muestra la figura 20 (una arandela interior y otra exterior). De esta forma conseguíamos fijar perfectamente cada uno de los extremos del haz al prototipo y conectar el extremo de las fibras con los fotosensores, PMTs en nuestro caso. También podemos observar que se realiza el giro de 180°, correspondiente a la U, con ayuda de cuatro codos de 45° y no con dos codos de 90°. Esto es debido a que, con giros progresivos, el haz de fibras centelleadoras está sometidos a una tensión inferior y, por extensión, producirá una mejor propagación de la señal luminosa.

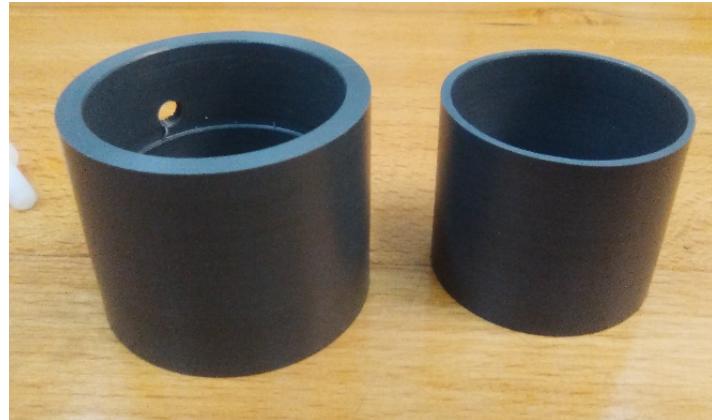


Figura 21 – Piezas de sujeción de los PMTs

Finalmente se utilizaron dos piezas, usualmente utilizadas en fontanería de PVC para comunicar tuberías de igual o diferente diámetro, para sostener los PMTs en el prototipo. Como hemos utilizado dos tapones distintos, necesitamos dos piezas diferentes, mostradas en la figura 21. La primera pieza (correspondiente a la pieza derecha de esta figura), más pequeña, simplemente encaja en el tapón circular por un extremo y, por el otro, con un diámetro interior más grande, se dispone del PMT. Para la segunda pieza encontramos un problema debido a la forma cuadrada del tapón, por lo que utilizamos una pieza que encaja en la arandela que sobresale del prototipo (utilizada para fijar el haz de fibras) y por el otro extremo en el PMT. Para mejorar la sujeción, se fijó esta pieza mediante un tornillo al soporte de metacrilato. La disposición de los PMT en el prototipo y el tornillo que ayuda a la sujeción pueden verse en la figura 22.

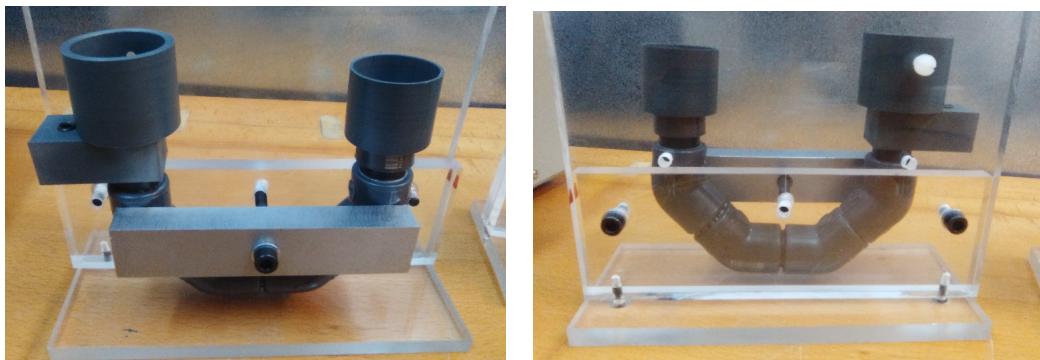


Figura 22 – Prototipo con piezas de sujeción

Hay que tener en cuenta que el proceso de medida se desarrolla en el interior de una cámara oscura, que protege los fotosensores de la luz exterior. En esta no hay un control de la

temperatura como en el sistema utilizado para la calibración de los SiPM. En su lugar únicamente activamos el aire acondicionado en el laboratorio para mantener una temperatura constante de aproximadamente 25 °C en todo momento.

Los PMTs empleados, R8520-ZB2771 y R8520-ZB2773 se alimentaron ambos a -830 V. A esta temperatura poseen una ganancias de $G_1 = 1456178$ y $G_2 = 1921595$ y sus eficiencia de fotodetección a $\lambda = 430$ nm son del 29,76 % y 28,66 %, respectivamente.

4.2. Procedimiento de llenado

Para realizar el llenado, en primer lugar necesitamos preparar la solución de agua tritiada. Para ello, hemos empleado una fuente radiactiva de tritio, consistente en una solución de agua tritiada (HTO en H₂O) de $2,0169 \pm 0,0017$ g de peso y una actividad específica de $A = 26,8 \pm 0,6$ MBq/g, con fecha de calibración del 16 de marzo de 2017. La actividad de esta fuente, desde el punto de vista de protección radiológica, es exenta [33]. La fuente fue proporcionada por PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig and Berlin), Alemania, con número de serie 2005-1442, y número de referencia PTB-6.11-285/03.2017, y fecha de referencia de 1 de enero de 2017 [33].

La solución que preparamos para el experimento, denominada solución patrón, consistió en diluir la ampolla que contenía la solución radiactiva en 0,5 L de agua hiperpura (destilada 5 veces y sin cationes, es decir conductividad muy baja), la cual fue proporcionada por el LARUEX de Cáceres, Universidad de Extremadura. Esta disolución fue realizada por Dña. Teresa Cámara en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LARAM) de la Universitat de València.

Finalmente, con la solución patrón ya preparada, se realizó el proceso de llenado del prototipo en la gammateca del IFIC, sala debidamente acondicionada para manipulación de fuentes radiactivas. Se prepararon un total de 500 cm³ de solución patrón, de los cuales se trasladaron 50 cm³ al IFIC. El mecanismo seguido para el proceso de llenado se describe a continuación:

1. En primer lugar, se dispuso una bandeja de plástico recubierta con material absorbente en el interior, en la cual se realizó todo el proceso de llenado. El objetivo de esta era evitar, en la medida de lo posible, una contaminación debido a un desbordamiento imprevisto en el proceso de llenado.
2. En segundo lugar, con ayuda de una pipeta y un embudo de cristal, se procedió a llenar una bureta. Para mayor seguridad, se fijó la bureta con un soporte de laboratorio.
3. En tercer lugar, con la bureta ya llena del agua tritiada, se procedió a introducir ésta en el prototipo. Para ello, se introdujo la punta de la bureta en el orificio de 8 mm del prototipo anteriormente descrito y, lentamente, se procedió al llenado del mismo. El proceso terminó cuando se introdujeron 39 cm³ ya que, como se ha mencionado anteriormente, esta es la capacidad del prototipo.
4. En cuarto lugar, se procedió a cerrar y sellar con silicona los orificios de purga y llenado

del prototipo. La disolución sobrante se vertió en una botella suficientemente segura, en la cual se conservará para un futuro uso. Esta disolución, junto con el material empleado en el proceso de llenado, se introdujo en una bolsa de plástico, que a su vez se introdujo en una caja de cartón, y todo ello fue debidamente guardado en el LARAM.

5. En último lugar, se trasladó el prototipo, debidamente relleno y sellado, al Laboratorio de Reacciones Nucleares del IFIC (025)

4.3. Configuración de la electrónica

Finalmente, con cada una de las partes del prototipo debidamente conectadas y calibradas y la fuente de tritio debidamente situada y asegurada, únicamente nos resta exponer la configuración de la parte electrónica del sistema que mide la señal proporcionada por el prototipo. El objetivo es obtener un espectro energético, con ayuda de un analizador multicanal analógico MCA, con tarjeta PCA3 y programa de adquisición Oxford WIN-MCA. La cadena electrónica está basada en tecnología NIM.

Necesitamos realizar una serie de transformaciones de la señal para que, por un lado, pueda ser analizada de manera adecuada por el MCA y, por otro lado, optimicemos al máximo la relación de la señal sobre el fondo. El esquema electrónico utilizado se muestra en la figura 23.

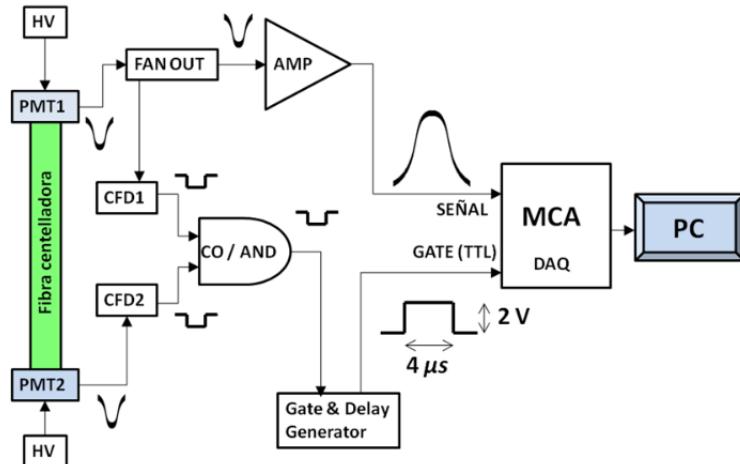


Figura 23 – Esquema Electrico [34]

1. En primer lugar sacaremos la señal de cada fotomultiplicador de la caja negra utilizada para apantallar la luz del exterior. Ello lo conseguimos con ayuda de cables BNC, ya que la caja dispone de puertos BNC macho que comunican el interior y el exterior.
2. Seguidamente dividimos la señales de un PMT en dos señales idénticas con ayuda de un divisor activo. Esta no es una simple división de la señal donde se produce un reparto de la intensidad, sino una copia exacta de la señal de entrada. Necesitamos este tipo de módulo y no una simple división, ya que, como se explico al inicio del trabajo, la señal de tritio es una señal muy débil, por lo que no nos podemos permitir tener pérdidas ni divisiones de

ésta. Esta división se ha realizado utilizando el módulo discriminador, del cual hablaremos más adelante.

3. Ahora dividimos la señal en dos caminos. Por un lado, la copia de la señal del PMT que se ha duplicado, se lleva a un preamplificador (marca Tennelec) y, seguidamente, a un amplificador (marca Tennelec, modelo TC 241), con una ganancia configurada de 50. Con este camino, conseguimos amplificar de manera adecuada la señal de un PMT, desde unos 60 mV hasta un total de unos 3 V, lo cual nos permite optimizar la escala disponible en el MCA (Entre 0 y 5 V). Nos referiremos a la señal obtenida por este camino como señal 1.
4. Por otro lado, las dos señales restantes (una señal de cada PMT) son llevadas por un camino distinto para obtener una señal que nos indique cuando hay coincidencia. Para conseguir esta segunda señal, hay que tener en cuenta que los PMTs producen señales analógicas y negativas. Por tanto, dado que esta señal de coincidencia es creada y tratada con tecnología NIM, necesitamos convertir estas señales en señales lógicas de estándar NIM. Esto lo conseguimos pasando cada una de estas dos señales por un módulo discriminador (CAEN, de cuatro canales), que produce una señal lógica en forma de escalón negativo, de altura de unos 800 mV y anchura variable, en nuestro caso 30 ns, para cada una de las señales, siempre y cuando la señal de entrada supere un umbral determinado, en nuestro caso 30 mV (hablamos en valores absolutos, hay que tener en cuenta que estas son negativas). De esta forma, eliminamos de manera considerable la corriente oscura de los PMT y, por extensión, el fondo.
5. A continuación, hacemos pasar ambas señales de la salida del discriminador por un módulo de coincidencias modelos CERN N 6234. Este genera una señal de salida sólo si las dos señales de entrada (procedentes de cada PMT tras pasar por el discriminador) están en coincidencia temporal. Estas cuatro señales (PMT, puerta lógica de cada PMT y puerta lógica de coincidencia) pueden verse en la figura 24.
6. A continuación, pasamos la señal de coincidencia a un módulo Gate & Delay Generator (marca ORTEC, modelo 416A). Este módulo genera una señal lógica en forma de escalón positivo, de altura 2 V y anchura de $4 \mu s$, anchura suficiente para comprender en su interior la totalidad de la señal 1. Esta puerta debe ser positiva debido a que éste es un requisito del MCA. Además, aplicaremos un retraso a esta señal que compense la diferencia de caminos seguidos entre ésta y la señal 1. Nos referiremos a la señal obtenida por este camino como señal 2.
7. En último lugar, pasamos al MCA tanto la señal 1 (señal de un PMT amplificada) como la señal 2 (que nos indica cuando ambos fotomultiplicadores han detectado una coincidencia). Estas dos señales pueden verse en la figura 25.

El MCA empleado dispone de la opción de crear un histograma de la señal 1, la cual sólo se leerá si la señal 2 es no nula, es decir, sólo leerá la señal 1 en la ventana proporcionada por la señal 2. Aquí reside la importancia de ajustar bien la anchura de la señal 2, ya que debe de ser suficiente para contener en todo momento la señal 1, pero ajustada tanto como sea posible para evitar la entrada de corriente oscura. Con esto conseguimos realizar una detección en coincidencia de ambos fotomultiplicadores, lo cual reduce enormemente el fondo del experimento.

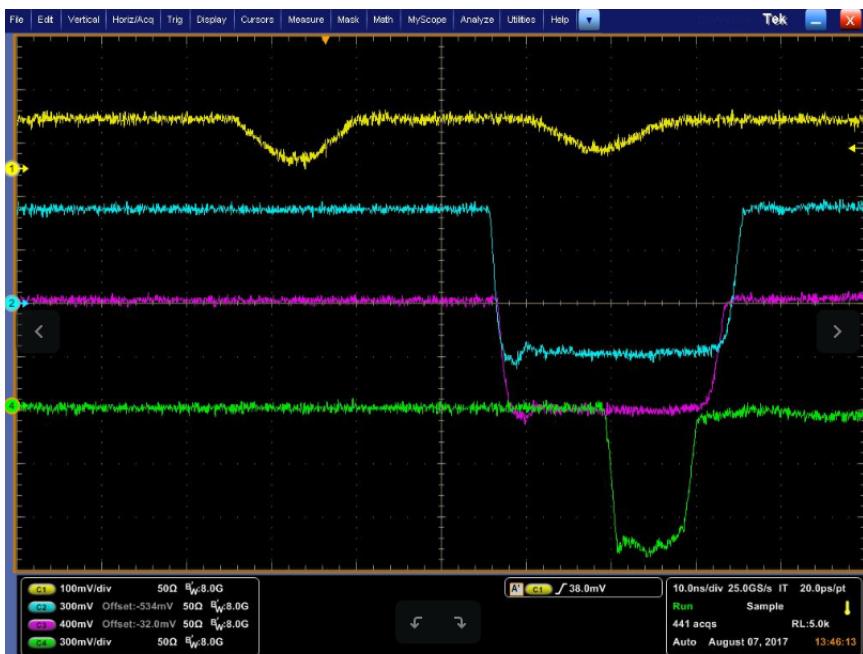


Figura 24 – Señal de salida del PMT (1), señal de salida del discriminador para cada PMT (2 y 3) y señal de salida del módulo de coincidencias respectivamente.



Figura 25 – Señales de entrada del MCA

4.4. Resultados

Ahora, con todas las partes del sistema convenientemente dispuestas y calibradas, procedimos a realizar las primeras medidas. Hay que tener en cuenta que en estas primeras medidas no necesitamos un sistema de control de temperatura, ya que vamos a utilizar PMT y estos no son tan sensibles a la temperatura como los SiPM. Únicamente debemos ser capaces de evitar oscilaciones grandes de temperatura ($\Delta T = 15 - 20 \text{ } ^\circ\text{C}$), las cuales sí afectan de forma apreciable a la ganancia del PMT. Esto lo podemos conseguir manteniendo el aire acondicionado de la sala experimental encendido y programado a una misma temperatura durante las medidas.

Sin embargo, cuando vayamos a realizar las medidas del prototipo con SiPMs, si necesitaremos este control exhaustivo de la temperatura, ya que, como se vió en la sección de calibrado del SiPM, 3.3, existe una dependencia muy marcada. Se necesitará adquirir un sistema de control de temperatura o, en su defecto, desarrollar uno nosotros mismos.

La primera medida se realizó sin coincidencia, pasando directamente la señal 1 al MCA, el cual nos permite obtener un histograma energético.

Se obtuvo un primer histograma del prototipo con agua destilada y sin tritio. Dado que el agua destilada idealmente no añade ningun tipo de contribución al histograma llamaremos a esta medida señal de fondo.

Seguidamente se empleó el prototipo lleno con agua tritiada y se obtuvo un segundo histograma. En esta segunda medida se pudo observar en el display del MCA que el número de cuentas medidas por segundo era mayor que el de la medida del fondo. Esto es un indicativo de que estamos detectando tritio.

Finalmente se normalizaron cada uno de los histogramas al tiempo correspondiente a su medida para obtener histogramas de actividad en lugar de un histograma de sucesos. Los tiempos asociados al histograma del tritio y del fondo son $T_S = 154143 \text{ s}$ y $T_B = 246987 \text{ s}$, respectivamente, medidas largas para tener suficiente estadística. El resultado puede verse en la figura 26 izquierda. Además, se ha añadido una segunda imagen, figura 26 derecha, en la que se representa la señal de tritio a la cual se le ha substraído la señal de fondo, es decir, en esta segunda imagen encontramos la señal debida únicamente al tritio.

En esta figura podemos observar que estamos detectando un pico de señal de aproximadamente $(50,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$ y una señal debida únicamente a tritio de aproximadamente $(13,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$.

Para determinar si nuestro sistema funciona de forma adecuada, podemos realizar un rápido cálculo para ver cual es la actividad que esperamos detectar con nuestro prototipo. Para ello, por un lado calculamos el volumen efectivo de la fuente (volumen de agua tritiada que contribuye a la señal final) y, por otro lado, utilizamos este volumen para determinar cual es la actividad que deberíamos medir en nuestro experimento.

1. Para calcular el volumen efectivo de la fuente tenemos en cuenta que los electrones procedentes de la desintegración del tritio tienen un recorrido libre medio de $5 \text{ } \mu\text{m}$. Por tanto,

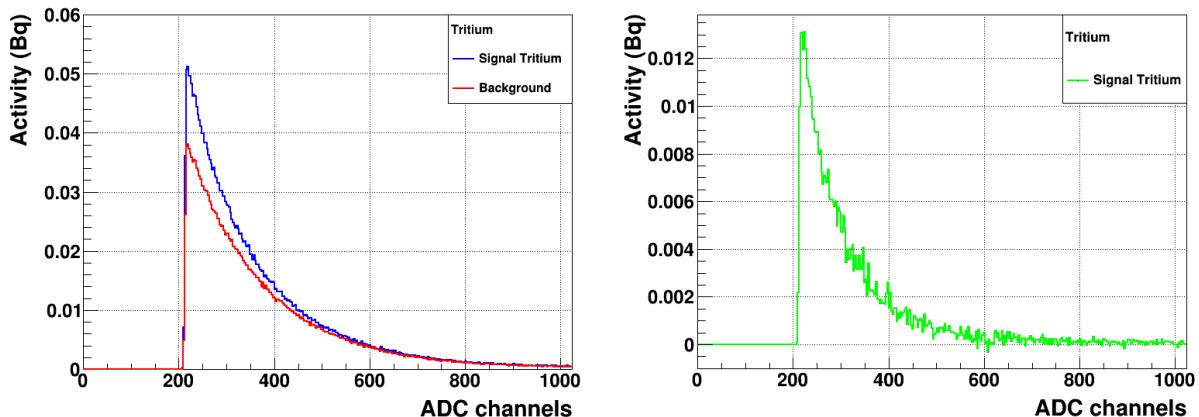


Figura 26 – Histograma energético de la señal del prototipo con tritio y del fondo superpuestos y señal únicamente debido al tritio.

únicamente contribuirá de forma apreciable a la señal el agua tritiada que se encuentre en un cilindro de grosor $5 \mu\text{m}$ alrededor de cada fibra. Pasamos a calcular este volumen. Para ello, calcularemos el volumen total y, a esta cantidad, le substraeremos el volumen ocupado por la fibra.

El volumen de la fibra es el volumen correspondiente a un cilindro de radio $0,5 \text{ mm}$ (radio de la fibra) y una longitud efectiva de 20 cm , donde se ha tenido en cuenta que, aunque la longitud real de la fibra son 25 cm , esta contiene en los extremos del haz unos aros metálicos y, además, parte de esta fibra sobresale del prototipo para acoplar a los PMTs. Por tanto, esta sección de la fibra, aproximadamente $2,5 \text{ cm}$ en cada extremo, no contribuye a la señal del tritio. Con todo esto, el volumen ocupado por la fibra será $V_{fibra} = 1,5708 \cdot 10^{-4} \text{ L}$.

Análogamente calculamos el volumen ocupado por la fuente más la fibra (volumen total), que corresponderá a un cilindro de radio $0,5 \text{ mm} + 5\mu\text{m}$ (radio de la fibra + radio efectivo de la fuente) y la misma longitud que la fibra, es decir, 20 cm . El volumen ocupado por la fibra y la parte de la fuente que contribuye a la señal de la fibra es $V_{total} = 1,6023 \cdot 10^{-4} \text{ L}$.

Por tanto el volumen ocupado únicamente por la fuente que esta interviniendo en la señal de esta fibra será la diferencia entre estos $V_{fuente} = 3,1573 \cdot 10^{-6} \text{ L}$.

Por tanto, teniendo en cuenta que el prototipo únicamente dispone de un haz formado por 35 fibras centelleadoras, el volumen efectivo final del agua tritiado que podemos detectar será el anterior multiplicado por 35, es decir, $1,1050 \cdot 10^{-4} \text{ L}$. Hay que tener en cuenta que, en esta última multiplicación, se ha supuesto que el volumen de agua tritiada asociada a cada fibra forma un conjunto disjunto y sabemos que esto no es así, ya que se producen solapamientos entre ellos. Debido a ello este cálculo será únicamente aproximado.

2. Ahora procedemos a calcular la actividad del prototipo conociendo el volumen de agua tritiada que está aportando la señal total. Para ello, tenemos en cuenta que la disolución contiene $2,0169 \pm 0,0017 \text{ g}$ de tritio con una actividad específica de $26,8 \pm 0,6 \text{ MBq/g}$ disueltos en medio litro de agua hiperpura (Sec. 4.2). Con esto podemos calcularla actividad total de la disolución, que aproximadamente de $108,11 \text{ MBq/L}$.

Por tanto, si en un litro hay aproximadamente $1,0811 \cdot 10^8$ desintegraciones por segundo, en el volumen calculado anteriormente habrá aproximadamente $1,1996 \cdot 10^4$ desintegraciones

por segundo, es decir, 11,996 kBq.

Finalmente, teniendo en cuenta que la eficiencia de las fibras y de los PMTs son, aproximadamente, 3 % y 30 % respectivamente y suponiendo que la cadena electrónica posee una eficiencia del 100 %, llegamos a que la actividad que deberíamos detectar es, aproximadamente 107,96 Bq.

Podemos ver que estamos detectando 4 órdenes de magnitud menos de lo que deberíamos. Esto es debido en parte a imperfecciones del sistema, pero la principal fuente de la pérdida de la señal es el hecho de que las fibras empleadas en este prototipo no poseen clad.

El clad hace que los fotones sean conducidos por el interior de las fibras a partir de reflexiones hasta el fotosensor, es decir, actúa como guía de luz. En nuestro caso, fibras sin clad, en cada reflexión se produce una pérdida del 94 % de la señal, por tanto, prácticamente la totalidad de los fotones de emisión de las fibras escaparán de estas, llegando al agua y produciendo de esta forma una pérdida de señal.

Como resultado únicamente detectaremos el porcentaje asociado al ángulo sólido cubierto por las fibras centelleadoras respecto al total de electrones emitidos por el tritio, cuya emisión supondremos isotrópica. Además, del total de fotones reemisados por las fibras centelleadoras (de nuevo se supone emisión isotrópica) ante la detección de este electrón, únicamente detectaremos el porcentaje asociado al ángulo sólido cubierto por la cara final de la fibra centelleadora. También hay que tener en cuenta que el porcentaje de fibra que se encuentra en la parte inferior de la U que constituye el prototipo apenas intervendrá en la señal, ya que vemos que prácticamente la totalidad de esta será perdida (su ángulo sólido es nulo).

Podemos realizar una rápida estimación de la magnitud relativa de estos ángulos sólidos para ver su importancia en la pérdida de la señal. Integrando la expresión del ángulo sólido para una esfera, esta toma la siguiente forma: $\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta)$ donde θ es el ángulo que subtende la superficie que queremos calcular [35]. Por tanto, dado que la superficie total de emisión será 4π ($\theta = 180^\circ$) el factor de reducción debido al ángulo sólido será:

$$\frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1 - \cos \theta}{2} \quad (31)$$

Si calculamos el ángulo y, por extensión, este factor para el caso del ángulo sólido subtendido por la fibra centelleadora, vemos que este ángulo siempre será aproximadamente 90° , debido al hecho que la fibra centelleadora es mucho mayor que su distancia al punto de la desintegración, $5\mu\text{m}$ como máximo. Por tanto, este factor será aproximadamente 0,5 en todo momento, es decir, aproximadamente la mitad de los electrones que se producen en este punto del agua tritiada pasan por la fibra. Sin embargo, la transmisión de fotones por las fibras al detectar un electrón es un factor realmente pequeño. Por ejemplo, un punto situado a 2 cm de la cara final de la fibra, posee un factor de $3,12 \cdot 10^{-4}$, llegando a valer 0 para los puntos correspondientes a la parte inferior del prototipo, como se ha mencionado anteriormente. Vemos por tanto, que si llega a ser un factor realmente relevante y que podría explicar la gran pérdida de señal observada.

Por tanto, debido a la necesidad de recolectar el máximo de luz, un paso inmediato en el

siguiente prototipo será incluir fibras con clad que nos permitan recolectar un mayor porcentaje de luz. El problema reside en que el grosor actual del single clad comercial de las fibras Saint-Gobain es de, aproximadamente, 4 % del diámetro, es decir, $40 \mu\text{m}$. Prácticamente ningún electrón conseguirá pasar el clad y ser detectado en el núcleo de la fibra, por lo que habrá que considerar otros mecanismos de guía de ondas. Una posible solución a este problema es incluir nosotros el clad en las fibras a partir del proceso de deposición de aluminio por evaporación en vacío. Esto lo podemos realizar en el ICMOL, departamento vecino del IFIC, con el cual ya se han realizado trabajos similares anteriores [26, 36]. De esta forma, podríamos conseguir un clad con un espesor del orden de cientos de nanómetros, espesor suficientemente pequeño para que un porcentaje aceptable de electrones derivados de la desintegración del tritio puedan superarlo.

En último lugar, para comprobar que nuestro argumento de la pérdida de la señal, situamos una fuente de actividad conocida, cuya emisión sea suficientemente energética, en el exterior del prototipo y procedemos a medir la señal.

Si ahora también medimos una actividad inferior a la actividad teórica estipulada por la fuente, $3 \mu\text{Ci} \approx 1,11 \cdot 10^5 \text{ Bq}$, no habremos confirmado nuestro argumento, pero si le habremos dado mucho peso ya que, una vez los fotones emitidos por la fibra llegan al PMT ya es realmente complicado perder la señal.

La fuente elegida es ^{137}Cs , el cual se desintegra β^- , según el siguiente esquema



cuyos electrones emitidos en esta desintegración poseen una energía promedio de 512 keV [3]. Estos electrones no llegaremos a verlos, pero tras esta desintegración el ^{137}Ba se encuentra en un estado excitado y, por consiguiente, se desexcita en un tiempo de 153 s a partir de una desintegración γ cuyos fotones tienen una energía de 662 keV [3]. Estos son los fotones que llegarán a la fibra centelleadoras y que pretendemos utilizar para obtener la eficiencia del sistema. Hay que tener en cuenta que, debido al pequeño tamaño de las fibras centelleadoras, únicamente aspiramos a detectar el valle Compton de esta desintegración, es decir, no conseguiremos observar el pico debido al efecto fotoeléctrico. Este valle Compton corresponde aproximadamente a un 10 % de las cuentas, es decir, únicamente aspiramos a detectar una actividad de $1,11 \cdot 10^4 \text{ Bq}$. Si además tenemos en cuenta la eficiencia de los PMTs y de las fibras centelleadoras, 30 % y 3 % respectivamente, únicamente aspiraremos a detectar una actividad de $99,9 \text{ Bq} \approx 1 \cdot 10^2 \text{ Bq}$.

En la figura 27, de forma similar al caso del tritio, mostramos el espectro medido con el prototipo y la fuente de ^{137}Cs .

En este espectro podemos ver que se ha medido una señal con una actividad aproximada de $(30,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \text{ Bq}$. Vemos que se trata de aproximadamente 3 órdenes de magnitud por debajo de lo que esperaríamos detectar.

Por tanto, procedemos a calcular el ángulo sólido para verificar que su valor podría explicar esta diferencia. Para ello, por un lado suponemos que únicamente tienen aportación a la señal los fotones que llegan directamente de la fuente y justo en la cara final del haz son absorbidos por las fibras centelleadoras y convertidos en luz de centelleo, ya que, por un lado,

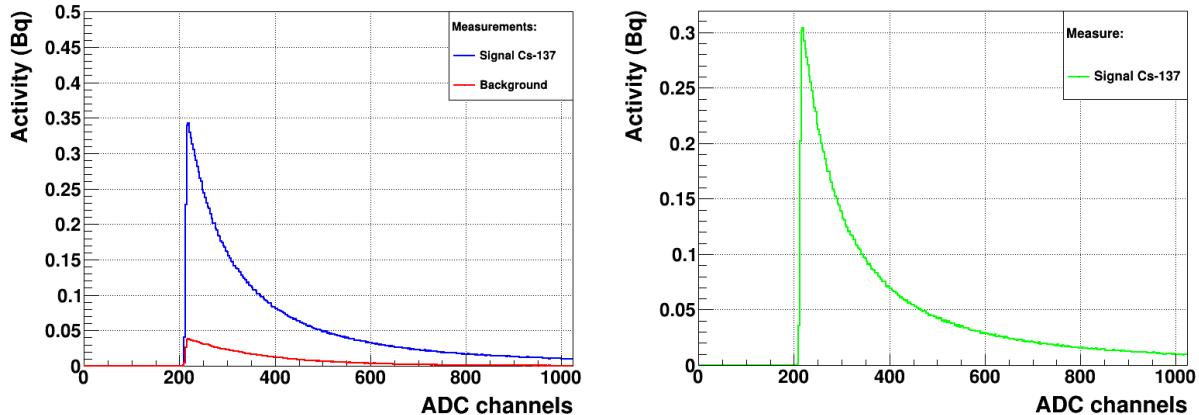


Figura 27 – Histograma energético de la señal del prototipo con fuente de ^{137}Cs y del fondo superpuestos y señal únicamente debido al ^{137}Cs .

debido al espectro de la eficiencia de fotodetección de los PMTs, los fotones de 662 keV que llegan al PMT no tendrán aportación significativa y, por otro lado, debido al ángulo sólido, los que se absorben a una distancia mínima de la cara final tampoco tendrán aportación. Además, tenemos en cuenta que la fuente se ha situado sobre la parte central de la U y debajo de la estructura de acero que sujetaba el prototipo (fig. 20). Con todo esto, el ángulo sólido calculado es aproximadamente $2,845 \cdot 10^{-3}$.

Vemos que este ángulo sólido justo nos aporta la diferencia de tres órdenes de magnitud que necesitamos. Tomando por válido nuestro argumento obtendríamos una señal máxima de 0,284 Bq, la cual vemos que se acerca de forma aceptable al valor esperado.

Por tanto, aunque no hayamos comprobado que la pérdida de señal sea debida al ángulo sólido, vemos que es esta hipótesis se ajusta a los resultados. Las mínimas desviaciones podrían ser debido a que se ha considerado que únicamente aportan a la señal los fotones detectados justo en la cara final. Esto ha sido una aproximación para realizar un rápido cálculo, pero realmente también tendrán aportación los fotones detectados a una distancia del orden del milímetro o inferior, lo cual se traduciría en un ligero aumento del ángulo sólido y por tanto, de la señal detectada. Este hecho podría explicar el resultado obtenido en esta prueba de verificación. La prueba que nos confirmará en último lugar nuestra hipótesis será las simulaciones realizadas sobre el experimento.

5. Simulaciones

Finalmente presentamos en este último punto las simulaciones realizadas sobre el experimento. Estas han sido desarrolladas mediante un código bastante avanzado sobre el que se han realizado una serie de modificaciones. Su finalidad es simular un prototipo del detector rectilíneo a diferencia del nuestro, que presenta forma de U. Una imagen transversal del prototipo puede verse en la figura 28.

Está formado por un cilindro externo de teflón de radio interno 2,5 cm, 0,5 cm de grosor y una longitud de 80 cm dando lugar a un volumen interno de 1,1781 l. En su interior residen

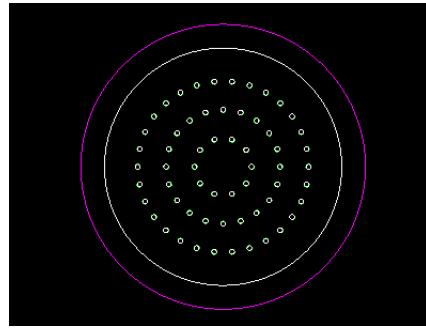


Figura 28 – Imagen transversal del prototipo

60 fibras centelleadoras, dispuestas formando 3 círculos según la figura 28. El círculo interno, con un diámetro de 6 mm, contiene 10 fibras, el círculo intermedio, con un diámetro de 12 mm, contiene 20 fibras y el círculo externo, con un diámetro de 18 mm contiene 30 fibras. El volumen efectivo interno (descontando el volumen ocupado por las fibras) es de 1,1498 L, volumen que en la práctica será ocupado por el agua tritada.

Las fibras que se han simulado pretenden ser las utilizadas hasta el momento, fibras centelleadoras BCF-12 de 1 mm de diámetro pero con longitud de 60 cm. En los 20 cm del cilindro de teflón que no están ocupados por las fibras centelleadoras (10 cm a cada lado) se pretende situar los PMTs o, en su defecto, los SiPMs para detectar los fotones que se reciban de las fibras. Ambos lados están separados por una ventana de cuarzo que permita el paso de los fotones y no del agua destilada, ya que ninguno de los fotosensores que utilizarán en este experimento puede encontrarse en contacto con el agua en ningún momento.

La simulación describe la emisión de una fuente de tritio que en la práctica se encontrará cubriendo por completo el volumen libre del interior del cilindro de teflón pero, con el objetivo de agilizar las simulaciones, sólo ha sido necesario implementar un interior de aire y unos cilindros de agua tritada de 50 μm de grosor alrededor de cada fibra centelleadora. Debido a que el recorrido libre medio de los electrones en el agua es 5 μm ambas situaciones son análogas.

Hay que tener en cuenta que los resultados presentados de estas simulaciones únicamente describen los electrones detectados en las fibras y la posterior conversión de estos en fotones. En esta simulación no se ha implementado el posterior tratamiento de la luz, por lo que todavía no podemos justificar la importancia de la pérdida de luz discutida en la sección 4.4.

Los resultados obtenidos para una simulación de 10000 eventos se muestran a continuación:

1. En primer lugar se ha realizado un histograma energético de los electrones emitidos en la desintegración del tritio, el cual se muestra en la figura 29.

Podemos ver que se trata de un espectro que se ajusta perfectamente al espectro teórico, fig. 1. Para conseguir un espectro más suave será necesario realizar una simulación con un mayor número de eventos, para lo cual será necesario acceder a uno de los centros de cálculo disponibles para disponer de una mayor potencia de computación.

2. Seguidamente, se realizó un histograma de la posición de la fibra en la cual se había

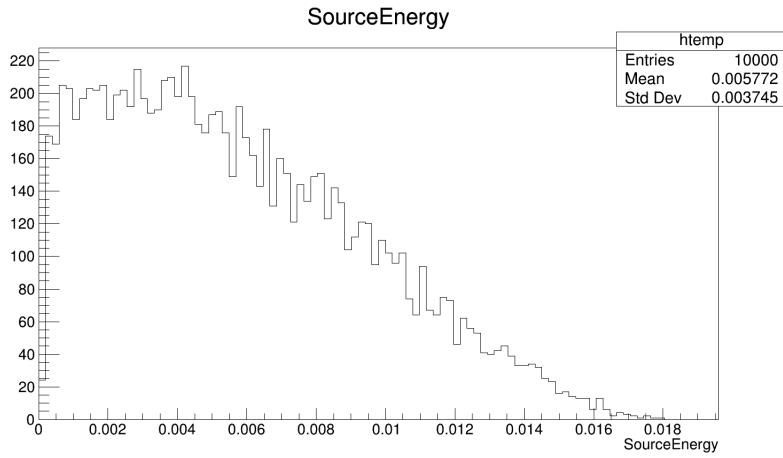


Figura 29 – Espectro simulado de los electrones procedentes de la desintegración del tritio (Escala en MeV)

detectado el suceso. Este se muestra en la figura 30, en la que se muestran tres imágenes asociadas a cada uno de los ejes espaciales.

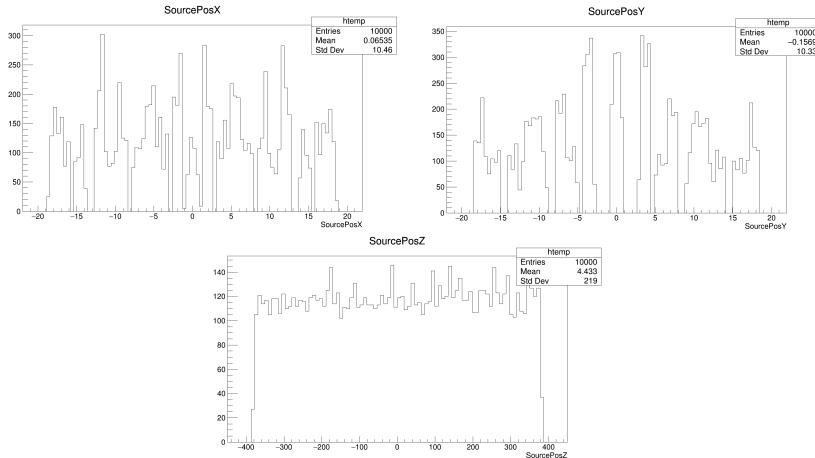


Figura 30 – Histograma espacial de la posición de detección de los electrones en las fibras

En los ejes X e Y puede apreciarse una detección más o menos uniforme en los puntos espaciales donde se encuentran situadas las fibras y, en el eje Z puede apreciarse una detección totalmente uniforme a lo largo de la longitud de las fibras. Este es un resultado que deberíamos esperar ya que se ha simulado una fuente de actividad uniforme y constante en el tiempo.

3. Se ha asignado un número del 1 al 60 a cada una de las fibras y se ha realizado un histograma del número de eventos que se han detectado en cada una de ellas. Este se muestra en la figura 31.

Podemos observar de nuevo que se trata de una deposición uniforme sobre las fibras. Todas han detectado aproximadamente el mismo número de eventos, algo que de nuevo deberíamos esperar.

4. Seguidamente se ha obtenido el espectro de energía depositada en el agua y en las fibras, además de las longitudes recorridas en ambos medios por los electrones del tritio. Ambas se muestran en las figuras 32 y 33, respectivamente

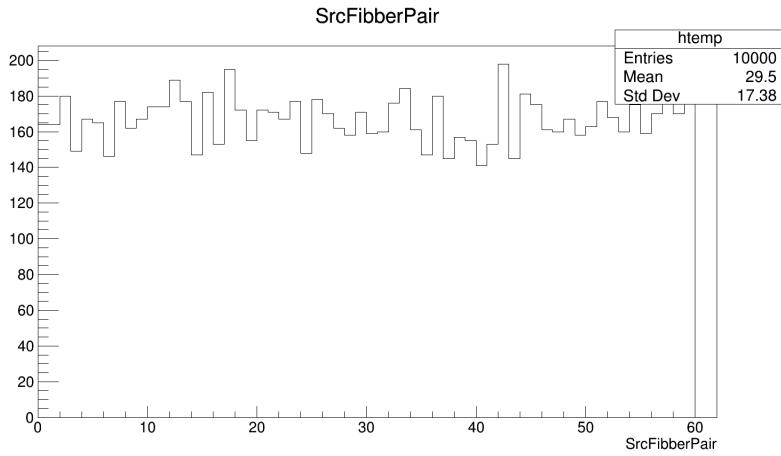


Figura 31 – Histograma de sucesos sobre cada fibra

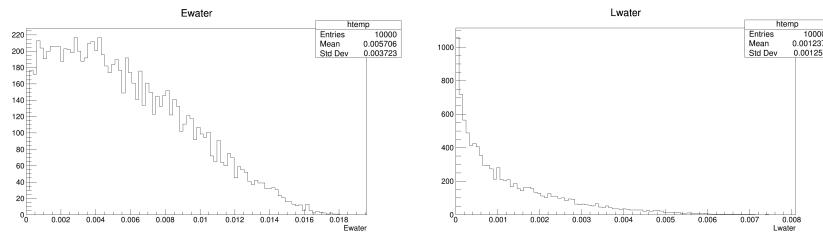


Figura 32 – Histograma energético y espacial de los electrones absorbidos en el agua

En la figura 32 podemos observar que la energía depositada presenta un espectro típico de una desintegración β y la longitud recorrida por los electrones presenta una atenuación exponencial, función que, teóricamente, describe el fenómeno de atenuación, $N = N_0 \exp(-x/\lambda)$.

Podemos observar por tanto que el programa está simulando correctamente la absorción de tritio en el agua. Algo similar ocurre en la figura 33, pero en estos histogramas no puede apreciarse debido a limitaciones que presenta el código desarrollado.

- Finalmente se ha obtenido un histograma del número de fotones producidos en cada detección del tritio. Este se muestra en la figura 34.

Dado que existe una equivalencia entre la energía de la partícula detectada en la fibra y el número de fotones que esta reemite, deberíamos esperar un espectro similar a una desintegración β , fig. 1. Podemos observar que, efectivamente, se cumple.

Hay que tener en cuenta que sólo han sido detectados y transformados en luz 217 eventos (2,17%). Vemos por tanto que el espectro queda muy poco definido. De nuevo, para una

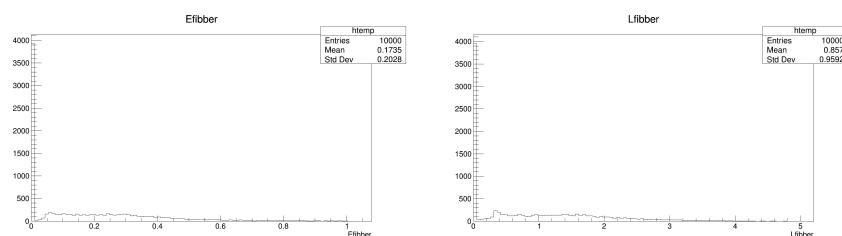


Figura 33 – Histograma energético y espacial de los electrones absorbidos en las fibras

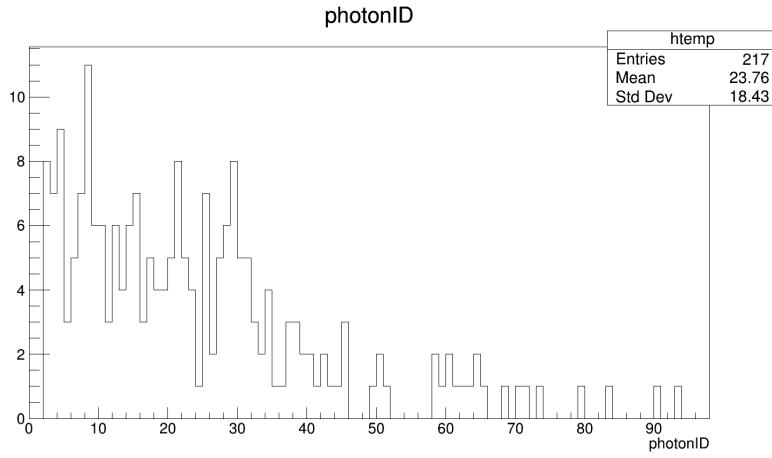


Figura 34 – Histograma del número de fotones reemisidos en una detección

mayor suavidad del espectro será necesario acceder al centro de cálculo del IFIC para disponer de una mayor potencia de computación.

Vemos por tanto que se ha realizado una simulación cuyo funcionamiento ha sido verificado. El siguiente paso será desarrollar la parte del tratamiento posterior de la luz, tanto a través de las fibras como su detección en el fotosensor. De esta forma podremos comprobar, entre otras cosas, la propagación de la luz en las fibras centelleadoras.

6. Previsiones de futuro

Como ya se ha mencionado, este dispositivo es un prototipo. La forma de proceder de *Tritium*, y en general de un experimento, es realizar todas las medidas posibles sobre éste y, cuando ya no podamos obtener más información, fabricar un nuevo prototipo que supere las limitaciones encontradas en el anterior. Nuevamente, realizar la misma labor sobre el siguiente prototipo. Se considerará que se ha llegado al diseño final cuando hayamos llegado al objetivo final del proyecto *Tritium* (detectar actividades del orden de cientos de Bq/L) o ya no podamos aplicar mejoras para conseguir una optimización del sistema de detección y poder, de esta forma, detectar niveles de actividades más bajas.

Según se ha calculado en la sección 4,4, nuestro dispositivo presenta una actividad aproximada de 108,11 MBq/L. Podemos observar que todavía estamos lejos del límite actual [4], por lo que, según se ha explicado, el siguiente paso es pasar a diseñar una nueva versión del prototipo.

Hay que tener en cuenta que aún podemos realizar una serie de medidas sobre este prototipo, tales como el cálculo de su eficiencia de fotodetección, los cuales nos permitirán determinar otras posibles mejoras que serán implementadas en el siguiente prototipo. Es importante obtener el máximo de información de cada prototipo para poder incluir una mayor optimización en la siguiente versión y, de esta forma, necesitar un menor número de prototipos para llegar al diseño final (abaratando de esta forma el proceso de I+D).

A pesar de que todavía se realizarán más medidas sobre este prototipo, ya se han encontrado ciertas limitaciones que serán subsanadas en la siguiente versión. Estas se citan a continuación:

1. En primer paso será la realización de medida con los SiPM con los que se realizó la calibración (Sec 3) ya que en el prototipo utilizado hasta el momento únicamente se han empleado PMT. El punto más importante de la sustitución de los PMTs por los SiPMs será la obtención de una mayor eficiencia del sistema, ya que los PMTs poseen una eficiencia bastante inferior, 30 %, en comparación con los SiPMs, 50 %.

Para poder depositar de forma segura los SiPM sobre el prototipo sera necesario el diseño de nuevas piezas de sujeción, ya que las actuales (Fig. 21) estaban específicamente diseñadas para la sujeción de los PMT.

2. Hay que tener en cuenta que se utilizaron los SiPM modelo S13360-1375CS de Hamamatsu Photonics (Sec. 3,1) de forma provisional, ya que son los que estaban disponibles en el laboratorio de reacciones nucleares y su espectro de PDE cumplía con los requisitos del proyecto (Fig. 8). Además son de tipo CS, es decir, disponen de dos terminaciones para una conexión rápida y no permanente. Sin embargo, la propuesta final de Tritium sería utilizar fotomultiplicadores modelo S13360-6075PE, que presentan exactamente las mismas características que los anteriormente mencionados, pero con un mayor tamaño, con una superficie total activa de $6 \times 6\text{mm}^2$, que les permite incluir 6000 píxeles, lo que implica un mayor rango dinámico. Además, estos SiPM son de tipo PE, es decir, presentan unas terminaciones que tiene que ir soldadas a la placa por lo que, para su utilización, se necesita disponer de la placa final que se utilizará en el prototipo. Dado que estos tienen que ir dispuestos sobre la tarjeta final del prototipo, retrasamos su utilización y, por el momento, realizaremos todas las pruebas sobre los SiPM actualmente utilizados, ya que ambos tienen similares características en casi todos los aspectos.
3. En tercer lugar se pretende sustituir la tarjeta conversora (fig. 10), tarjeta diseñada para NEXT, por una tarjeta especialmente diseñada para nuestro fin. Antes de empezar a diseñar la nueva tarjeta, consideraremos todas las características necesarias que deban ser implementadas en el siguiente prototipo. Por un lado, uno de los pilares fundamentales del proyecto *Tritium* será crear un proceso de automatización que compense las variaciones de la ganancia debidas a cambios en la temperatura, compensadas con cambios en el voltaje operacional (Sec. 3,5). Por otro lado, el diseño final del detector que pretende desarrollar el proyecto *Tritium* presenta un gran número de haces de fibras centelleadoras, a priori desconocido, y que habrá que calcular con ayuda de simulaciones, y, por extensión, necesitaremos un gran número de SiPM en las terminaciones de estos haces. Debido a ello, nos encontramos con la necesidad de desarrollar un proceso automático de calibración de los SiPM. Por todo ello, la tarjeta diseñada para el segundo prototipo deberá de ser capaz de llevar a cabo el proceso de automatización. Para empezar con el diseño a pequeña escala de este proceso de automatización, se utilizará una tarjeta que sólo contiene cuatro posibles entradas (cada una de las cuales estará asociada a un SiPM). Además, dispone de varios caminos para realizar esta automatización (por medio de relés o multiplexores) y dispone de la posibilidad de obtener la señal amplificada o sin amplificar, lo que nos

permitirá determinar cual de todos estos caminos tiene menos cross-talk entre señales y da mejores resultados. Esta tarjeta se diseñó en el IFIC para el proyecto NEXT-100, que requiere unos requisitos muy similares a los nuestros [37]. Esta tarjeta puede verse en la figura 35 izquierda.

Habrá que familiarizarse con el programa LabView, programa elegido para desarrollar el código de automatización, ya que cumple con todos los requisitos impuestos por el proyecto, disponemos de trabajos anteriores muy similares a nuestro proyecto realizados con este programa por compañeros del IFIC y, además, el IFIC posee licencia para su uso. También habrá que familiarizarse con el uso de algún tipo de microcontrolador capaz de realizar esta labor de automatización. En concreto se utilizarán Arduinos, ya que son rápidos, eficaces y económicos. El arduino utilizado, Arduino Mega, puede verse en la figura 35 derecha.

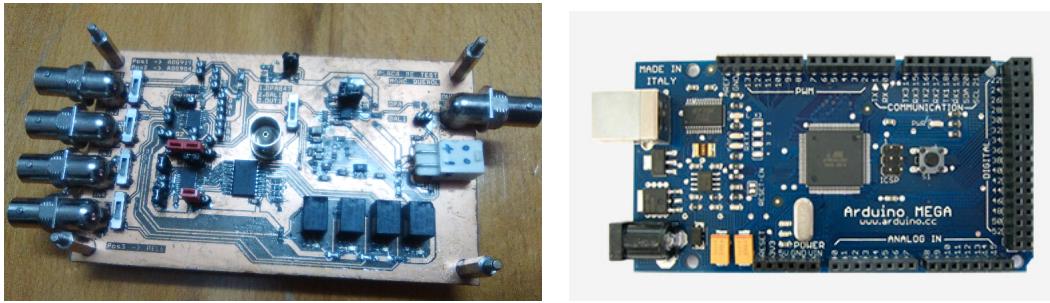


Figura 35 – Tarjeta de automatización y Arduino Mega

Lo más importante de esta tarjeta es que, por un lado, realiza el proceso de automatización y, por otro, nos permite interaccionar con todas las partes importantes de nuestro experimento, tales como fuente de tensión de alimentación, distintos componentes del sistema, osciloscopios, etc., mediante LabView. Como ya se ha mencionado anteriormente esta tarjeta formará parte de un prototipo. El diseño final contendrá un número mucho mayor de haces de fibras centelleadoras, necesitando un número elevado de SiPM su lectura. Es de vital importancia la automatización tanto de la calibración de SiPM como del control de componentes, ya que calibrar un número elevado de SiPM (en principio se han previsto 64 SiPM) es un trabajo que llevaría demasiado tiempo. Además, para poder controlar de forma efectiva un número tan elevado de SiPM, es necesario un control automático.

4. En cuarto lugar, también habrá que proceder a aluminizar las fibras centelleadoras por evaporación en vacío, proceso que se realizará en el ICMOL, tema discutido en la sección 4.4.
5. En quinto lugar, hemos observado que la electrónica empleada presenta una gran cantidad de ruido, por lo que será necesario conseguir electrónica de bajo ruido en un futuro, para poder separar la señal del fondo.
6. En sexto lugar, habrá que mejorar las simulaciones, incluyendo el tratamiento de la luz tras su emisión en las fibras centelleadoras, tema que nos permitirá evaluar la importancia del guiado de luz en las fibras centelleadoras, tema discutido en la sección 4.4.
7. En séptimo lugar, se desarrollará un segundo prototipo con una forma diferente ya que se vio que, aunque la forma de U sea la más segura para evitar posibles fugas, no es la más eficiente. En principio, los primeros diseños apuntan a un segundo prototipo rectilíneo,

similar al de las simulaciones realizadas ya que, aparentemente, es el diseño que tiene una menor pérdida de luz por ángulo sólido.

8. Por último, se pretende desarrollar un sistema de control de temperatura en el laboratorio de reacciones nucleares. Para ello se construirá una caja de algún material térmicamente aislante, por ejemplo poliespán, en el interior de la cual residirá nuestro foco frío y caliente. El foco frío consistirá en una resistencia térmica unida a un ventilador de 12 V y el foco frío consistirá en un aire acondicionado [38].

7. Resultados y conclusiones

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto *Tritium*. El contenido del mismo incluye la fabricación del primer prototipo, destinado a validar las ideas en las que se basa el proyecto, y la de algunos de los componentes esenciales del mismo. Los principales logros, resultados y conclusiones son los siguientes:

1. Se ha diseñado un prototipo de detector de tritio basado en fibras centelleadoras, en forma de U leídas por fotosensores, para lo cuál se han estudiado previamente las referencias existentes de detección de tritio en agua.
2. Se han construido dos unidades de este prototipo, cuyo interior puede albergar una capacidad de 39 mL, de solución radiactiva. La mecanización de las piezas se ha realizado en el Taller de Mecánica del IFIC.
3. Se han construido dos haces de fibras centelleadoras sin clad, como sistema de detección de estos prototipos. La guillotina empleada para cortar las fibras se ha construido en el Taller de Mecánica del IFIC.
4. Se ha llenado uno de los prototipos con una solución de agua tritiada con una actividad de 108,11 MBq/L (sec. 4,4), preparada en el LARAM. La razón de emplear una actividad tan elevada es el poder validar y comprobar en un tiempo reducido las características de la señal del tritio en las fibras centelleadoras. El segundo prototipo se ha llenado con agua destilada, a fin de poder medir la señal de fondo.
5. Se ha puesto a punto la cadena electrónica de adquisición de datos, descrita en el trabajo.
6. Se han instalado ambos prototipos en una caja negra, diseñada y construida en los laboratorios del IFIC, para realizar las medidas con el menor fondo posible.
7. Se ha medido la señal de ambos prototipos con fotomultiplicadores calibrados, disponibles en el laboratorio de Reacciones Nucleares. Aunque los fotosensores previstos en Tritium son SiPM, en un primer prototipo era aconsejable emplear fotosensores calibrados y bien conocidos en medidas anteriores.
8. Se han realizado medidas tanto de la señal como del fondo a lo largo de un mes. Se ha obtenido, mediante un tratamiento de datos *off-line*, que incluye la substracción del fondo, la señal de actividad del tritio (fig. 26).

9. Se ha obtenido, una eficiencia de detección inferior a la prevista, lo que implica una pérdida de sucesos, dando una actividad del agua tritiada inferior al valor real. Este hecho implica una pérdida sustancial de la luz de centelleo cuando se transmite a lo largo de la fibra centelleadora.
10. Desconocemos por ahora la razón de obtener una señal inferior a la prevista. Entre las posibles razones están: problemas en la refracción total en la interface plástico-agua, debida a impurezas en la superficie de la fibra centelleadora, o a aire disuelto en la solución radiactiva. También podrían entrar en juego problemas producidos por la geometría en forma de U, que podría conllevar que con una probabilidad muy alta que uno de los ángulos de incidencia en la propagación de la luz sea menor que el de reflexión total y se pierda la luz de centelleo en el agua. Investigar el mecanismo de pérdida de luz es la prioridad esencial en la continuación de nuestras investigaciones. Las conclusiones de estas investigaciones determinarán la forma de los nuevos prototipos y los posibles tratamientos de la superficie de las fibras centelleadoras, que podrían incluir aluminización o depósito de otra molécula mediante evaporación en el ICMOL.
11. Se ha estudiado la dependencia de la ganancia con la temperatura de SiPM similares a los que serán empleados en Tritium, en una caja térmica. Se han desarrollado procedimientos de estabilización de la ganancia mediante variación del voltaje, que se han programado en macros de ROOT.
12. Se han estudiado posibles tarjetas y microprocesadores que podrían llevar a cabo de forma automática las tareas de calibración y estabilización de la ganancia de los SiPM. En una primera etapa emplearemos microprocesadores Arduinos gestionados por LabView.
13. Se ha implementado en GEANT4 un dispositivo de detección de tritio en agua mediante fibras centelleadoras similar al empleado, pero rectilíneo. Estas simulaciones son un primer paso para disponer de simulaciones realistas para todos los prototipos que se elaboren en el desarrollo del proyecto Tritium.

Agradecimientos

En la realización de este trabajo he recibido ayuda de diferentes personas y me gustaría agradecer a todos estos el haber utilizado parte de su tiempo en mi.

En primer lugar, quería agradecer a mis dos tutores, José Díaz y Nadia Yahlali, el intentar transmitirme en todo momento tantos conocimientos como les ha sido posible, yendo en muchas ocasiones más allá de los conocimientos correspondientes a este trabajo. Por facilitarme cualquier tipo de herramienta o material que agilizase mi proceso de aprendizaje o mi trabajo. Agradecer en concreto que me haya facilitado las medidas de calibración de los PMTs utilizados en el prototipo, además de ciertas macros de ROOT, desarrolladas por ellos mismos, que me sirvieron como base para el desarrollo de los macros que se utilizaron en este trabajo. También por informarme acerca de muchas de las herramientas de las que se dispone en el laboratorio y, en general, de las que dispone el IFIC, algunas de los cuales no eran necesarios para el desarrollo del TFM. Por utilizar gran parte de su tiempo en ayudarme a solucionar muchos de los problemas

que me han ido surgiendo en el laboratorio. Finalmente, agradecer el haberme incluirme en todo tipo de procesos referidos al proyecto *Tritium*.

En segundo lugar agradecer a los ingenieros electrónicos del IFIC D. Marc Querol, D. Vicente Álvarez y D. Javier Rodríguez que, a pesar de no disponer de tiempo libre, intentaron ayudarme en cualquier duda que tuviese sobre el equipo electrónico y me facilitaron el material que necesitase. Al Dr. Carlos Azevedo, de la Universidad de Aveiro, Portugal, por ayudarme en el aprendizaje de la programación con Geant 4, facilitarme el programa de simulación con un diseño rectilíneo del prototipo y resolverme cualquier duda acerca de las simulaciones o la programación, y a D. José Manuel Monserrate, del Servicio de Mecánica del IFIC, por su ayuda con la fabricación del prototipo.

Finalmente agradezco a los investigadores del IFIMED Dr. John Barrio, Dra. Gabriela Llosá y Dra. Ana Ros que nos prestasen su tiempo e instalaciones para desarrollar la calibración de los SiPM, a Dña. Teresa Cámara del IFIC, por realizar la disolución radiactiva, el proceso de llenado de ésta en el prototipo y por facilitarme cualquier tipo de material o ayuda que necesitase, a Dña. Vanesa Delgado del LARAM por su colaboración en la elaboración del protocolo de llenado del prototipo y a Dña. Rosa Carrasco del IFIC por supervisar el protocolo de manipulación de la solución radiactiva y aportar parte del material necesario para el llenado del prototipo y su señalización como fuente radiactiva.

Referencias

- [1] A. TARANCÓN, H. BAGÁN, G. RAURET y J.F. GARCÍA, *Comprative study of pre-treatment procedures for ³H monitoring in water samples from environmental protection programs*, Science of the Total Environment, **Vol. 408** (2010) 2233-2238.
- [2] ZOLTÁN KÖLLO, *Tesis: Studies on a plastic scintillator detector for activity measurement of tritiated water*, Facultad de Física, Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT), Karlsruhe, Alemania, 17/07/2015
- [3] EDITOR: RICHARD B. FIRESTONE y VIRGINIA S. SHIRLEY, ASSISTANT EDITOR: CORAL M. BAGLIN, S. Y. FRANK CHU y JEAN ZIPKIN, *Table of Isotopes*, 8^a Edición, **vol. 1**, 1995
- [4] M. RATHNAKARAN, R.M. RAVETKAR y M.C. ABANI, *A Real-time Tritium-In-Water Monitor for Measurement Of Heavy Water Leak To The Secondary Coolant*, IAEA INIS, **Vol. 32** (2000) p-3a-197.
- [5] MASAO MATSUYAMA, KENICHI TAKATSUKA y MASANORI HARA, *Sensitivity of a specially designed calorimeter for absolute evaluation of tritium concentration in water*, Fusion Engineering and Design, **Vol. 85** (2010) 2045-2048.
- [6] YUJI HATANO, MASANORI HARA, HIROKO OHUCHI-YOSHIDA, HIROFUMI NAKAMURA y TOSHIHIKO YAMANISHI, *Measurement of tritium concentration in water by imaging plate*, Fusion Engineering and Design, **Vol. 87** (2012) 965-968.
- [7] N.P. KHERANI, *An alternative approach to tritium-in-water monitoring*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **Vol. 484** (2002) 650-659.

- [8] M. HERRANS, N. ALEGRÍA, R. IDOETA y F. LEGARDA, *Sampling tritiated water vapor from the atmosphere by an active system using silica gel*, Radiation Physics and Chemistry, **Vol. 80** (2011) 1172-1177.
- [9] C. BRAY, A. PAILLOUX y S. PLUMERI, *Tritiated water detection in the 2.17 μM spectral region by cavity ring down spectroscopy*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **Vol. 789** (2015) 43-49.
- [10] S. AGOSTINELLI ET AL., Geant4 - A Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **506**(2003) 250-303.
- [11] J. ALLISON ET AL., Geant4 Developments and Applications, IEEE Transactions on Nuclear Science **53** (2006) 270-278.
- [12] J. ALLISON ET AL., Recent Developments in Geant4, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **835** (2016) 186-225.
- [13] RENE BRUN y FONS RADEMAKERS, *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Ver también [root.cern.ch/](<http://root.cern.ch/>) **A 389** (1997) 81-86.
- [14] K.W. JANG, D.H. CHO, W.J. YOO, J.K. SEO, J.Y. HEO, J.-Y. PARK y B. LEE, *Fiber-optic radiation sensor for detection of tritium*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **Vol. 652** (2011) 928-931.
- [15] ALBERTO SOLER CAMBRA, *Memoria de Prácticas externas: Protocolo de preparación y caracterización de fibras centelladoras para el detector Tritium*, Facultad de Física, Universitat de València, España, 2017.
- [16] W. R. LEO, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 2^a Edición, 1994.
- [17] SAINT-GOBAIN CRYSTALS, *Scintillating Optical Fibers*, www.crystals.saint-gobain.com, 2005-14.
- [18] DAVID SÁEZ-RODRÍGUEZ, KRISTIAN NIELSON, OLE BANG y DAVID JOHN WEBB, *Simple room temperature method for polymer optical fibre cleaving*, Journal of Lightwave Technology, **Vol. 33** (2015) NO. 23
- [19] S.H. LAW, J.D. HARVEY, R.J. KRUHLAK, M. SONG, E. WU, G.W. BARTON, M.A. VAN EIJKELNBORG y M.C.J. LARGE *Cleaving of microstructured polymer optical fibres*, Optics Communications, **Vol. 258** (2006) 193-202.
- [20] JOEL S. GEARHARD, *Ph. D. Thesis: Investigation of BCF-12 plastic scintillating coherent fiber bundle timing properties*, Facultad de ingeniería física de la Escuela de Postgrado de Ingeniería y Gestión, Instituto de Tecnología de las fuerzas aéreas, Base en Ohio, Marzo de 2012.
- [21] THORLABS, *Guide to connectorization and polishing optical fibers*, www.thorlabs.com, 2006.

- [22] ALEJANDRO SÁNCHEZ LÓPEZ, *Tesis de Máster: Estudio de las propiedades de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)*, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Departamento de Física teórica y del Cosmos, 23/06/2015
- [23] SIMON R. CHERRY, JAMES A. SORENSEN y MICHAEL E. PHELPS, *Physics in Nuclear Medicine*, 4^a Edición, Saunders Elsevier, 2012.
- [24] HAMAMATSU PHOTONICS, *MPPCs (Multi-Pixel Photon Counter) for precision measurement*, www.hamamatsu.com/eu/en/index.html
- [25] KARINA ASMAR, *Tesis de Máster: Control de la dependencia en la temperatura de la ganancia de los detectores de silicio de radiacion (SiPM) mediante la tensión de polarización*, Universidad Complutense de Madrid, España, Junio 2012.
- [26] DAVID LORCA GALINDO, *Tesis Doctoral : SiPM based tracking for detector calibration in NEXT*, Facultad de Física, Universitat València, España, Marzo de 2015.
- [27] DYCOMETAL, <http://www.dycometal.com/>.
- [28] ROITHNER LASERTHECHNIK, *LED435-03 Blue LED Lamp*, <http://www.roithner-laser.com/>
- [29] HAMAMATSU PHOTONICS, *MPPC (Multi-Pixel Photon Counter): Technical Information*, www.hamamatsu.com/eu/en/index.html
- [30] DANILO PIPARO, GÜNTER QUAST y MANUEL ZEISE, *A ROOT Guide For Students "Diving Into ROOT"*, Institut für Experimentelle Kernphysik, Alemania, Febrero 2012.
- [31] MIROSLAV MORHÁČ, *Processing and Visualization Functions*, <https://root.cern.ch/root>
- [32] FERNANDO HUESO GONZÁLEZ, *Informe de Prácticas externas: Calibración de SiPM del plano de trazas del detector NEXT1-EL*, Facultad de Física, Universitat de València, España, Abril 2011.
- [33] JOSÉ DÍAZ MEDINA, *Protocolo de manipulación de la fuente radiactiva de tritio*, Report interno, IFIC, Paterna, Valencia, España, 2017.
- [34] ANDRÉS BATALLER MARTÍ, *Trabajo de fin de grado: Medidas de la eficiencia luminosa de fibras centelleadoras para el diseño de detectores de dosimetría médica*, Facultad de Física, Universitat de València, España, Septiembre de 2015.
- [35] JERROLD E. MARSDEN y ANTHONY J. TROMBA *Cálculo vectorial*, 3^a Edición, Addison-Wesley Iberoamericana, 1988.
- [36] NADIA YAHLALI, L.M.P. FERNANDES y DAVID LORCA, *Characterization of UV-enhanced SIPMs for Imaging in a High Pressure Xenon Electroluminescent TPC*, 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) Marseille, Francia, Junio 2013, publicado en Proceedings of the 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCEMENTS IN NUCLEAR INSTRUMENTATION, MEASUREMENT METHODS AND THEIR APPLICATIONS (ANIMMA), D. MerelliI (Ed.), IEEE, 2013.

- [37] MARC QUEROL SEGURA, *Proyecto fin de grado: Sistema de test para la caracterización de los fotomultiplicadores de silicio de la cámara de proyección temporal NEXT-100*, Escola Técnica Superior d'Enginyeria, Universitat València, España, 2013.
- [38] LUIS VILLARREAL RAMÍREZ, *Construcción y prueba de un cámara térmica para caracterizar un gamma-detector (SiPM). Construction of a climatic chamber to test the thermal behavior of a SiPM detector*, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, ESPAÑA, Junio 2012.