



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Diseño y caracterización de la electrónica para el plano de energía del experimento NEXT

PhD dissertation by
Vicente Álvarez Puerta

under the supervision of
Vicente Herrero Bosch
José Francisco Toledo Alarcón

Diciembre 2024

Resumen

El experimento NEXT se encuentra entre los más importantes en la búsqueda de la desintegración doble beta sin neutrinos, lo cual despejaría una de las incógnitas más importantes de la física en los últimos años: ¿Es el neutrino su propia antipartícula?

Para tratar de contestar esa cuestión, NEXT utiliza una TPC (Time Projection Chamber) con gas xenón enriquecido a alta presión, que cuenta con dos planos fotosensores. Uno de ellos está cubierto por PMTs (Photo Multiplier Tube) y se encarga de recoger la luz que se produce por el xenón cuando ocurre un evento, midiendo la energía de éste. El otro plano consiste en una matriz de SiPMs (Silicon PhotoMultipliers) que permite reconstruir de manera tridimensional la traza de dicho evento. El experimento NEXT marca la diferencia con otros experimentos que buscan la desintegración doble beta sin neutrinos gracias a la acción combinada de dichos planos que ofrece un gran rechazo a los eventos de fondo.

Esta tesis doctoral tiene como objetivo el estudio y diseño de la electrónica involucrada en el plano de energía del detector NEXT-White desde los PMTs ubicados en el plano hasta las tarjetas de acondicionamiento (*Front end electronics*), incluyendo elementos tales como el cableado y las bases de polarización, en los cuales hay que cumplir severas medidas de radiopureza. Además de las soluciones de tipo electrónico también se han aportado soluciones a problemas técnicos de aspecto mecánico y térmico.

Uno de los elementos más relevantes del sistema y en el cuál se centra principalmente esta tesis, es la tarjeta de *front-end*. En la descripción de su proceso de diseño se plantea como se superaron condicionantes como el acoplamiento AC y se alcanzaron las estrictas especificaciones de resolución energética, linealidad y la radiopureza. Además se presentará un algoritmo para restaurar la línea de base, así como la forma del pulso que permite una correcta interpretación de los datos por parte del sistema de adquisición. Para finalizar se habla de posibles mejoras para NEXT-100, la siguiente versión del experimento.

Resum

L'experiment NEXT es troba entre els més importants en la cerca de la desintegració doble beta sense neutrins, la qual cosa buidaria una de les incògnites més importants de la física dels últims anys: ¿És el neutrí la seua pròpia antipartícula?

Per a tractar de contestar aquesta qüestió, NEXT utilitza una TPC (Time Projection Chamber) amb gas xenon enriquit a alta pressió, que compta amb dos plans de fotosensors. Un d'ells està cobert per PMTs (Photo Multiplier Tube) i s'encarrega de recollir la llum que es produeix pel xenon quan ocorre un esdeveniment, mesurant la seua energia. L'altre pla consisteix en una matriu de SiPMs (Silicon PhotoMultipliers) que permet reconstruir de manera tridimensional la traça d'aquest esdeveniment. L'experiment NEXT marca la diferència amb altres experiments que busquen la desintegració doble beta sense neutrins gràcies a que l'acció combinada dels dos planols ofereix un gran rebuig als esdeveniments de fons.

Aquesta tesi doctoral té com a objectiu l'estudi i disseny de l'electrònica involucrada al planol d'energia del detector NEXT-White desde els PMTs situats en el planol, fins a les targetes de condicionament (*Front end electronics*), incloent-hi altres elements com són el cablejat i les bases de polarització, en els quals cal complir severes mesures de ràdiopuresa. A més de les solucions de tipus electrònic s'han aportat solucions a problemes tècnics d'aspecte mecànic i tèrmic.

Un dels elements més rellevants del sistema i en el qual es centra principalment aquesta tesi, és la targeta de front-end. En la descripció del seu procés de

disseny es planteja com es varen superar condicionants com l'acoblament AC i s'assoliren les estrictes especificacions de resolució energètica, linealitat i la ràdiopuresa. A més es presenta un algoritme per a restaurar la línia de base així com la forma del pols que permet una correcta interpretació de les dades per part del sistema d'adquisició de dades. Per a finalitzar es parla de possibles millores per a NEXT-100, la següent versió de l'experiment.

Abstract

The NEXT experiment is among the most important in the search for neutrinoless double beta decay, which would clear up one of the most important questions in physics in recent years: Is the neutrino its own antiparticle?

To try to answer this question, NEXT uses a TPC (Time Projection Chamber) with high-pressure enriched xenon gas, in addition to two planes of photosensors. One of them is covered by PMTs (Photo Multiplier Tube) and is responsible for collecting the light produced by the xenon when an event occurs, measuring its energy. The other plane consists of an array of SiPMs (Silicon PhotoMultipliers) that allows a three-dimensional reconstruction of the trace of the event. The NEXT experiment differs from other experiments that search for neutrinoless double beta decay because of the high rejection of the background events due to the combined action of both photo-sensor planes.

This doctoral thesis aims at studying and designing the electronics involved in the energy plane of the NEXT-White detector, starting from the PMTs located in the plane, up to the conditioning electronics cards (Front end electronics), including cabling and polarization bases, in which strict radiopurity specifications must be accomplished. In addition to purely electronic developments, other solutions have been proposed to solve mechanical and thermal problems.

One of the most relevant elements of the system, and the main focus of this thesis, is the front-end electronics card. Along its design process description, solutions introduced to overcome system constraints such as AC coupling, and

to accomplish strict energy resolution, linearity and radiopurity specifications will be explained. In addition, an algorithm has been developed to restore the baseline and the pulse shape for a correct interpretation of the data by the DAQ system. Finally, possible improvements for NEXT-100, the next version of the experiment, are discussed.

Agradecimientos

La verdad es que no sabría por dónde empezar a dar las gracias, tengo tanto que agradecer y a tanta gente que no sé por dónde empezar. Hay personas a las que les debo mucho personal y profesionalmente, y no son pocas.

Voy a empezar por los compañeros que hace tiempo dejaron de serlo para convertirse en amigos, no doy nombres, vosotros sabéis quienes sois y sin cada uno de vosotros no hubiera llegado hasta aquí ni sería quien soy. Además de toda la gente que me he ido encontrando a lo largo de los años, desde que empecé en NEXT. Que han ido aportando en mi vida, tanto bueno como malo, con lo que me he ido forjando hasta llegar al día de hoy, un día que muchos pensaban que no llegaría, el día de finalizar esta tesis. Gracias por todos los "¿Y la tesis para cuándo?", "¿Ya has acabado la tesis?", "No te quedará mucho...", y así un sinfín de veces (si las nombro todas no acabaría). Pero gracias a ellas iba cogiendo el impulso necesario para continuar, poco a poco, pero continuar.

Gracias a mis amigos de toda la vida, porque aunque no han ayudado, tampoco han molestado.

Gracias a Vicente y Curro, sin vuestra sabiduría y paciencia, no hubiera podido terminar el camino. Sois un faro para mí y un espejo donde mirarme.

Sé que hay personas, a las que doy las gracias menos de lo que debería, y esta es una gran oportunidad para hacerlo. Gracias a mis padres, que sin su esfuerzo no habría podido llegar a donde estoy. Gracias por educarme de la manera que lo han hecho, mostrándome un camino al que era posible llegar con esfuerzo, y valentía. Gracias por todo eso y más, sin vosotros esto no hubiera sido posible.

No tengo palabras suficientes, ni cabe en este texto, lo agradecido que estoy al pilar de mi vida, la que pone la fuerza y el corazón, la que me guía con su luz y le da sentido a todo. Moni, sin tu apoyo continuo y la manera que tienes de aguantarme, esto no hubiera sido posible. Te quiero mil, el piquito no tiene fin. Ari y Danae, los sois todo en mi vida.

Por todo ello, Gracias.

Índice general

Resumen	III
Resumen	V
Abstract	VII
Agradecimientos	IX
Contents	XI
1 El experimento NEXT	1
1.1 Desintegración doble beta sin neutrinos ($\beta\beta 0\nu$)	2
1.1.1 Experimentos $\beta\beta$	4
1.2 El concepto NEXT	8
1.3 Evolución de los detectores de la familia NEXT	10
1.3.1 NEXT-DEMO	10
1.3.2 NEW	15
1.3.3 NEXT-100 y más allá	36

2 Motivación y objetivos de la tesis	39
2.1 Motivación	39
2.2 Metodología de diseño integrada con las simulaciones físicas	39
2.3 Objetivos	40
3 Soluciones adoptadas y desarrollo	43
3.1 Impacto de la radiopureza en el desarrollo del proyecto	43
3.2 PMT como fotosensores	44
3.2.1 Fundamentos de los PMT	44
3.2.2 Detectores ópticos	44
3.2.3 Fotomultiplicadores	44
3.2.4 Utilizando PMTs	49
3.2.5 Características más importantes relacionadas con el proyecto	59
3.2.6 Diseño de bases	59
3.3 Conexión a tierra del cátodo del PMT y sus consecuencias.	60
3.4 Diseño de la electrónica de acondicionamiento	63
3.4.1 Requerimientos de diseño.	64
3.4.2 Solución de alto valor de constante de tiempo (τ).	65
3.4.3 Evolución del diseño de FEE	68
3.4.4 Simulación en Pspice	84
3.4.5 Etapa de alimentación	87
3.4.6 Diseño mecánico	90
3.4.7 Diseño de la PCB	92
3.4.8 Medidas de ruido	93
3.4.9 Modelo del FEE para simulación.	94
3.5 Algoritmo BLR	97
3.5.1 Implementación del algoritmo de la restauración de la linea base	98
3.5.2 Implementación del sistema de adquisición de datos.	104
3.5.3 Resultados.	105

3.6	Diseño de las bases de polarización de los PMT	108
3.6.1	Requerimientos de diseño.	109
3.6.2	Diseño	112
3.6.3	Simulaciones térmicas	114
3.6.4	Linealidad.	115
3.6.5	Radiopureza	117
4	Test de validación y Resultados finales	119
4.1	Tests	119
4.1.1	Test de alta tensión en las bases	119
4.1.2	Test térmicos	121
4.1.3	Test de linealidad.	124
4.1.4	Test de chispas eléctricas en vacío (Efecto Paschen)	128
4.2	Radiopureza	128
4.2.1	Radiopureza de las bases de los PMTs	133
5	Resultados de energía en NEW	137
5.1	Primeros resultados sobre la resolución de energía del detector NEXT-White (NEW).	137
5.1.1	Selección y reconstrucción de eventos	139
5.1.2	Medida de energía	140
5.1.3	Distribución espacial de eventos y cortes fiduciales restringidos	141
5.1.4	Calibración de energía absoluta	143
5.1.5	Resolución en energía	143
5.1.6	Rayos X en Xenón	144
5.1.7	Gammas de alta energía.	145
6	Líneas futuras: NEXT-100	147
6.1	Estudios de la problemática	147

6.2 Soluciones adoptadas.	148
6.2.1 Pasamuros y conectores	148
6.2.2 Resistencias de las bases	150
6.2.3 Evolución en las medidas de energía. De NEXT-100 a NEXT-HD	151
 7 Conclusiones	 153
 Publicaciones	 159
 Acronimos	 161
 Referencias	 165

*"La ciencia nunca resuelve un problema sin crear
otros 10 más"*

– George Bernard Shaw

1

El experimento NEXT

El trabajo realizado en esta tesis esta desarrollado en el experimento NEXT (Neutrinos Experiment in a Xenon TPC), en él se busca la desintegración doble beta de ^{136}Xe utilizando una cámara de proyección temporal TPC (Time Projection Chamber) radiopura, llena a alta presión con 100 kg de gas xenon enriquecido con su isotopo 136. El experimento está localizado en el *Laboratorio Subterráneo de Canfranc* (LSC), un laboratorio que situa a 850 metros de profundidad bajo la montaña Tobazo, en el lado español de los pirineos. NEXT será la primera TPC de grandes dimensiones con gas a alta presión que use electroluminiscencia con tecnología SOFT (Separated Optimized Function TPC). Las siguientes secciones muestran los aspectos más relevantes del experimento que permiten optimizar la detección de la desintegración doble beta sin neutrinos.

1.1 Desintegración doble beta sin neutrinos ($\beta\beta 0\nu$)

El modelo estándar (SM) de física de partículas, es una teoría sobre las interacciones nucleares electromagnéticas, débiles y fuertes, las cuales describen las propiedades fundamentales de partículas subatómicas. Este modelo funciona bien en general, pero aún presenta carencias, la mayoría de ellas relacionadas con los neutrinos. Estas partículas son únicas en muchos aspectos; en concreto, su falta de carga electromagnética significa que, de las tres fuerzas fundamentales descritas por el SM (electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte), sólo siente la fuerza débil. El modelo estándar requiere neutrinos sin masa en su formulación básica, pero los experimentos recientes sobre oscilaciones de neutrinos han demostrado que son partículas masivas, lo que abriría un nuevo campo de la física más allá del modelo estándar actual.

Los neutrinos pueden ser las únicas partículas que tienen un término de masa de Majorana¹, prohibido a los otros fermiones, explicando la diferente escala de masa de los neutrinos en comparación con otras partículas fundamentales. La evidencia experimental de este fenómeno tendría profundas implicaciones en la física y la cosmología, ya que las partículas de Majorana serían sus propias antipartículas según lo descrito por [Majorana 1937] .

Si los neutrinos son partículas de Majorana, la desintegración doble beta sin neutrinos ($\beta\beta 0\nu$) debería ser observable y por lo tanto permitiría probar esta hipótesis. Adicionalmente la medida de su tasa de desintegración proporcionaría información sobre la masa del neutrino.

La desintegración doble beta ($\beta\beta$) es una transición muy rara en la que un núcleo con Z protones se transforma en un núcleo con $Z + 2$ protones y el mismo número de masa A ². Sólo se puede observar en aquellos isótopos en los que el modo de desintegración β está prohibido debido a que la energía de los núcleos hijos es más alta que la energía de los núcleos padres. Si se cumple esta condición, son posibles dos desintegraciones β simultáneas.

¹Si una partícula tiene una función de onda ψ que satisface la ecuación de Majorana, la cantidad m en la ecuación se llama la masa de Majorana.

²La masa atómica (A) se obtiene sumando el número de protones y de neutrones de un núcleo determinado

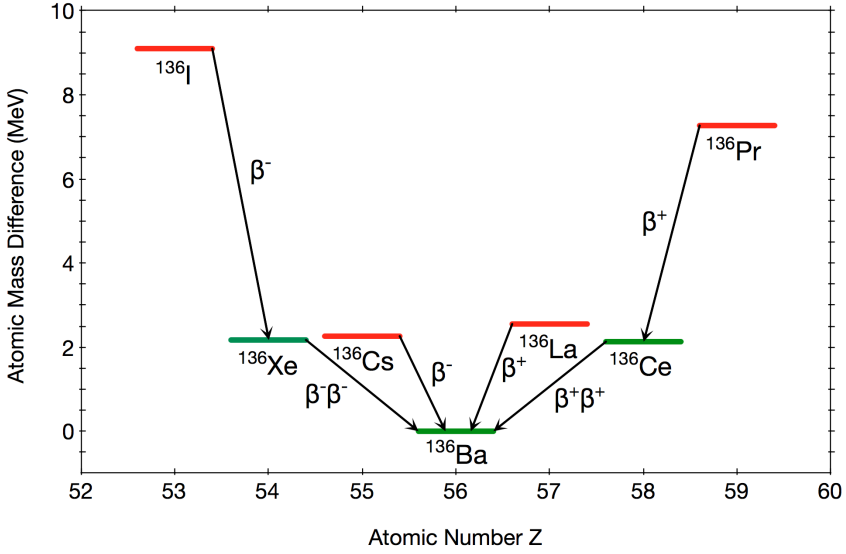


Figura 1.1: Las masas atómicas de isótopos con $A = 136$ dados como diferencias con respecto al isótopo más unido, ^{136}Ba . Los niveles rojos indican núclidos impares, mientras que los verdes indican pares uniformes. Las flechas muestran el tipo de transición nuclear que conecta los niveles. Las transiciones doble beta son posibles porque el estado intermedio ($\Delta Z = \pm 1$) está menos limitado, lo que prohíbe la desintegración beta [Martín-Albo y col. 2016]

Normalmente se consideran dos modos de desintegración $\beta\beta$. El modelo estándar de desintegración doble beta de dos neutrinos ($\beta\beta 2\nu$) fue propuesto por Goeppert-Mayer en 1935 y se ha observado en varios núcleos, donde se emite un antineutrino asociado a cada electrón. Este proceso tiene vidas medias típicas del orden de $10^{18} - 10^{21}$ años.

En el modo de desintegración doble beta sin neutrinos ($\beta\beta 0\nu$) los electrones transportan toda la energía liberada en la desintegración. Este proceso, que fue postulado por Furry en 1939 y aún no se ha observado, está prohibido en el modelo estándar de física de partículas (SM).

En el caso de $\beta\beta 0\nu$, la suma de las energías cinéticas de los dos electrones liberados es siempre la misma, y corresponde a la diferencia de masa entre los núcleos principal y secundario: $Q_{\beta\beta} \equiv M(Z, A) - M(Z + 2, A)$. Sin embargo,

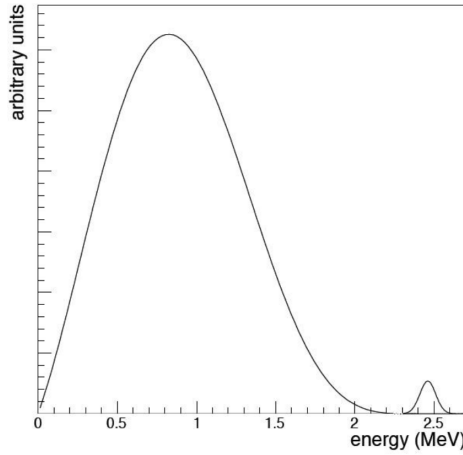


Figura 1.2: El espectro de energía de los electrones emitidos en la desintegración $\beta\beta$ de ^{136}Xe , como se ve con una resolución de energía de 1% FWHM en $Q_{\beta\beta}$. El pico izquierdo corresponde a la desintegración $\beta\beta 2\nu$, mientras que el pico derecho, centrado en $Q_{\beta\beta} = 2458 \text{ keV}$, corresponde a $\beta\beta 0\nu$. La escala de normalización entre los dos picos es arbitraria.

debido a la resolución de energía finita de cualquier detector, los eventos $\beta\beta 0\nu$ se reconstruyen dentro de un rango de energía distinto de cero centrado alrededor de $Q_{\beta\beta}$, normalmente siguiendo una distribución gaussiana, como se muestra en la figura 1.2. Otros procesos que ocurren en el detector pueden caer en esa región de energías, convirtiéndose así en actividad de fondo, también llamado *background* y comprometiendo drásticamente la sensibilidad esperada del experimento a $m_{\beta\beta}$.

1.1.1 Experimentos $\beta\beta$

El objetivo principal de básicamente todos los experimentos de desintegración doble beta es medir la energía total de la radiación emitida por una fuente $\beta\beta$. En una desintegración doble beta sin neutrinos, la suma de las energías de los dos electrones emitidos es constante e igual a la diferencia de masa entre los átomos padre e hijos ($Q_{\beta\beta}$). Cualquier experimento que desee medir la vida media de $\beta\beta 0\nu$ debe poder contar un número suficiente de eventos asociados a este

fenómeno, sin embargo la medida está limitada por la sensibilidad experimental del detector empleado.

Las fluctuaciones naturales y los efectos del detector combinados junto con la actividad de fondo de los radioisótopos naturales pueden contaminar la región energética. Por esa razón, los materiales con los que se construye el detector deben seleccionarse cuidadosamente para reducir la radioactividad natural presente en todos los materiales. Además, los experimentos de desintegración $\beta\beta$ deben realizarse en instalaciones subterráneas, a fin de reducir los niveles de actividad de fondo de la radiación atmosférica. Finalmente, la actividad de fondo intrínseco del modo de desintegración $\beta\beta 2\nu$, que tiene un espectro continuo de energía, puede ser problemático si la resolución energética en la zona objetivo no es suficientemente buena.

Tres experimentos de la generación actual ya están tomando datos:

Por un lado, el experimento GERDA [Agostini y col. 2015a] busca la desintegración doble beta sin neutrinos de ^{76}Ge en el *Laboratori Nazionale del Gran Sasso*. En GERDA, los detectores de germanio de alta pureza (HPGe) están suspendidos de cuerdas y montados en soportes especiales de baja masa hechos de cobre ultra puro y teflón (PTFE). Las cuerdas están suspendidas dentro de un criostato de acero inoxidable con aislamiento de vacío de 4,2 m de diámetro y 8,9 m de altura y se llenan con 64 m³ de argón líquido. Un revestimiento de cobre de 6 cm de espesor cubre la cubierta cilíndrica interna del criostato. El criostato se coloca en un tanque de agua de 590 m³ que sirve como escudo para la radiación gamma y los neutrones. Además está equipado con un fotomultiplicador (también llamado PMT) que sirve como veto de muones basado en la radiación de Cherenkov generada por las partículas que atraviesan el tanque. La Colaboración GERDA ha publicado una medida de la vida media de $\beta\beta 2\nu$ de ^{76}Ge , $T_{1/2}^{2\nu}(^{76}\text{Ge}) = (1,926 \pm 0,095) \times 10^{21}$ años [Agostini y col. 2015b] y un límite en la vida media de $\beta\beta 0\nu$, $T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) \Rightarrow 2,1 \times 10^{25}$ años (90 % CL) [Palioselitis 2015] .

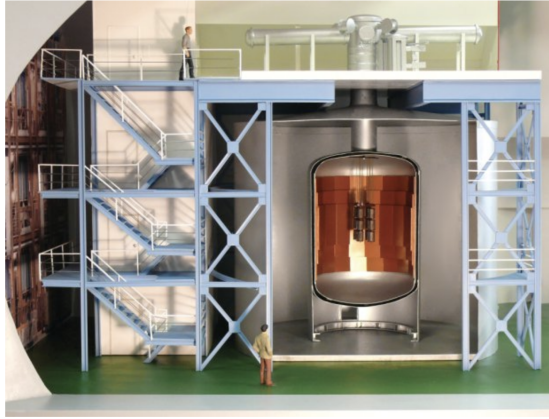


Figura 1.3: *Detector GERDA*([GERDA])

Por otro lado, hay detectores basados en xenón como KamLAND-Zen [Gando y col. 2013](figura 1.4), un globo transparente a base de nylon con un diámetro de 3,08 m, que contiene 13 toneladas de centelleador líquido cargado con 320 kg de xenón (enriquecido a 91 % en ^{136}Xe). El globo está suspendido en el centro de una vasija esférica de acero inoxidable con 1879 PMTs montados en la superficie interior, que registran la luz de centelleo generada por los eventos $\beta\beta$ que se producen en el detector. Con esta configuración, ha logrado una resolución de energía extrapolada de 9,9% FWHM al valor $Q_{\beta\beta}$ de ^{136}Xe , publicando recientemente un límite en la vida media de $\beta\beta 0\nu$ de $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 1,9 \times 10^{25}$ años.

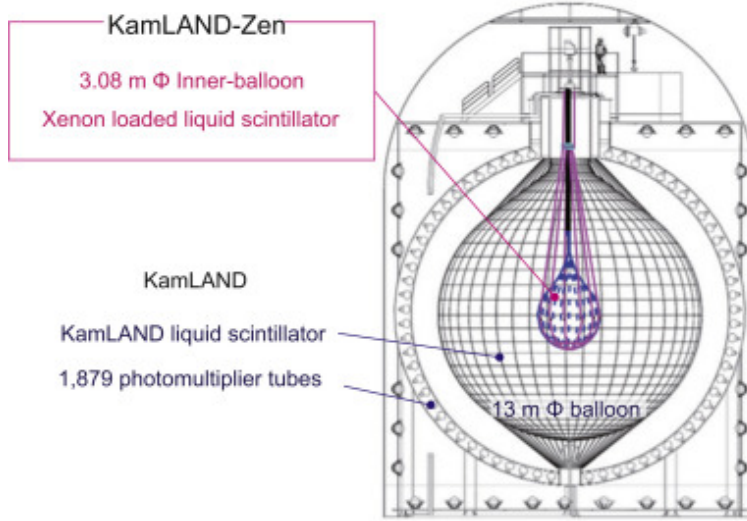


Figura 1.4: Detector KamLAND-zen

Paralelamente, la colaboración EXO ha publicado un límite en la vida media de $\beta\beta 0\nu$ de $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 1,6 \times 10^{25}$ años [Auger y col. 2012] utilizando el detector EXO-200, una TPC simétrica con 110 kg de xenón líquido (enriquecido al 80,6 % en ^{136}Xe). En EXO-200, las cargas de ionización en el xenón creado por las partículas cargadas se desvían hacia los dos ánodos de la TPC debido a la presencia de un campo eléctrico. Los eventos en la cámara son reconstruidos por un par de planos de hilos cruzados que miden su amplitud y coordenadas transversales, y una serie de fotodiodos de avalancha (APD), que detectan la luz de centelleo de xenón con $\lambda = 175 \text{ nm}$. Los lados de la cámara están cubiertos con láminas de teflón que actúan como reflectores de VUV, mejorando la colección de luz. El detector EXO-200 ha alcanzado una resolución de energía de 4 % FWHM al valor $Q_{\beta\beta}$ de ^{136}Xe .

La siguiente fase de EXO es nEXO ("next EXO"), un experimento a escala de toneladas usando Xenon 136 para buscar la desintegración doble beta sin neutrinos. La colaboración está experimentando una extensa investigación y desarrollo para diseñar el detector de xenón y una forma de etiquetar el ion de bario producido por la descomposición para eliminar la actividad de fondo.

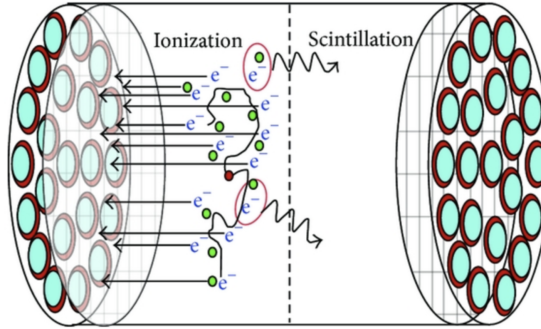


Figura 1.5: Detector nEXO

La combinación de los resultados de KamLAND-Zen y EXO da un límite de $T_{1/2}^{0\nu}(^{136}\text{Xe}) > 3,4 \times 10^{25}$ años (120 – 250 meV, dependiendo de la matriz de elementos nucleares (NME)) [Gando y col. 2013].

A los experimentos nombrados, se unió un nuevo experimento de desintegración doble beta sin neutrinos denominado NEXT. Emplea el mismo elemento que los anteriores (^{136}Xe) y se ubica en el *Laboratorio Subterráneo de Canfranc*. En la siguiente sección se desarrollará el concepto NEXT como una nueva generación de detectores.

1.2 El concepto NEXT

El detector NEXT utiliza el concepto SOFT (Separated, Optimized Functions TPC) (figura 1.6), que consiste en la idea de separar la lectura de las geometrías de las reacciones de desintegración y la lectura de la energía de las mismas. [Nygren 2009]. Utilizando este concepto, se puede optimizar tanto la resolución energética como la lectura de trazas que realizan los experimentos descritos en las secciones anteriores, ya que empleamos elementos distintos para cada función. Cuando un e^- cargado interactúa con el xenón de alta presión, ioniza y excita sus átomos figura 1.6. La energía de excitación provoca una rápida emisión de luz de centelleo VUV (175nm) conocido como S1, que se detecta por un plano

de PMT ubicados detrás de un cátodo transparente en un lado de la TPC, y que da el inicio del evento (t_0). El campo eléctrico presente en el volumen activo del detector evita que los electrones ionizados dejados por el paso de la partícula cargada se recombinen. Finalmente esos electrones alcanzan la región del ánodo de la TPC donde se aplica un campo eléctrico más intenso entre dos mallas adyacentes. En esta región se aceleran e induce la producción de excitación secundaria de átomos de xenón mediante amplificación por electroluminiscencia (EL). La luz de la EL se genera a unos pocos milímetros de una matriz de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), que se denomina como “plano de trazas” ya que registran la traza del evento. Como la luz EL se emite de forma isotrópica, aproximadamente la mitad alcanzará el plano de PMTs, desde ahora el “plano de energía”, lo que proporcionará una medición de energía precisa (S2).

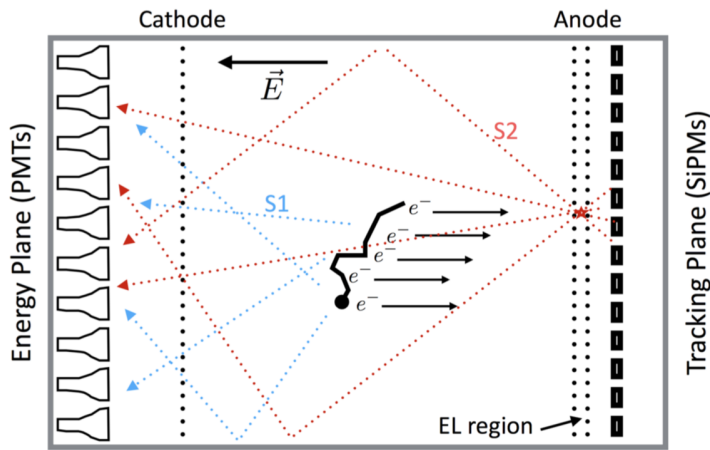


Figura 1.6: El concepto de TPC de Funciones Separadas y Optimizadas (SOFT (Separated, Optimized Functions TPC)). La luz EL (Electroluminiscencia) generada en el ánodo se registra en el plano fotosensor justo detrás de ella y se utiliza para el plano de trazas. También se registra en el plano fotosensor detrás del cátodo transparente y se utiliza para una medición de energía precisa.

La ventaja de las funciones separadas para las dos mediciones es el desacoplamiento de la configuración operativa entre los dos planos de sensores, lo que brinda más libertad para modificar los parámetros de cada conjunto, optimizando el rendimiento de todo el detector.

1.3 Evolución de los detectores de la familia NEXT

1.3.1 NEXT-DEMO

NEXT-DEMO [Álvarez y col. 2013], que se muestra en figura 1.7, fue la primera versión de prueba para evaluar las diversas soluciones tecnológicas que debían de aplicarse posteriormente en las distintas versiones del experimento NEXT. El volumen activo de su TPC es de 30 cm de diámetro x 30 cm de longitud. En este caso el tubo de luz estaba compuesto por una sección transversal hexagonal de PTFE insertada en el volumen activo. La vasija contenedora de la TPC está diseñada para soportar hasta 15 bar. El gas xenón circula en un circuito cerrado a través de la vasija y un sistema de filtros purificadores. En este caso el detector no es radiopuro, y no está protegido contra la radiactividad natural. Está instalado en una sala semi-limpia (figura 1.8) en el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), en Valencia.

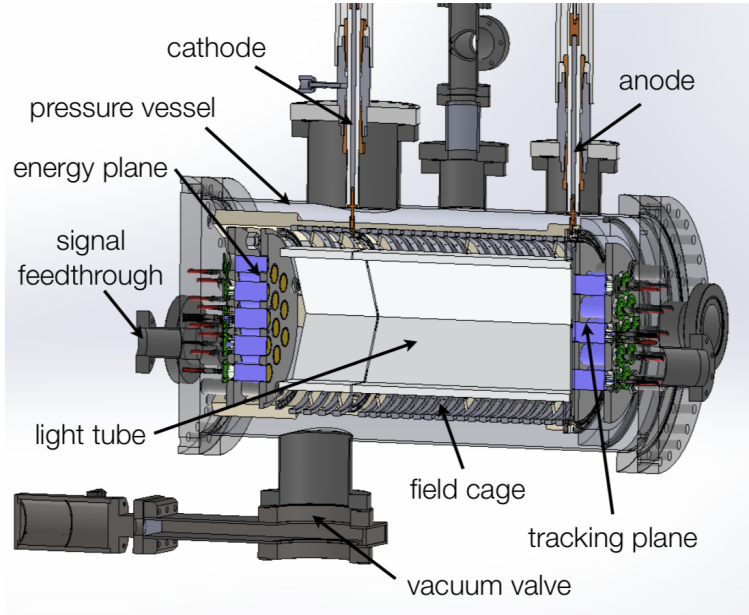


Figura 1.7: Dibujo de la sección transversal del detector NEXT-DEMO con las partes principales etiquetadas.

Los objetivos específicos del prototipo fueron principalmente los siguientes:

- Demostrar una buena resolución de energía en el volumen activo
- Reconstruir la firma topológica de los electrones en el gas de xenón a alta presión (HPXe)
- Verificar el efecto de las tensiones aplicadas en el TPC sobre las longitudes de deriva de las cargas
- Comprender la recirculación y purificación del gas en un gran volumen, incluida la estabilidad de la operación y la robustez contra las fugas
- Comprender la recolección de luz y el uso de desplazadores de longitud de onda (Wave Length Shifter, WLS)

La versión inicial de NEXT-DEMO tenía un plano de trazas implementado con 19 PMTs resistentes a la presión, idénticos a los utilizados en el plano de energía pero operados a una ganancia menor. La instrumentación del plano de trazas con PMTs (a diferencia de NEW y NEXT-100, que utilizan SiPM) permitió simplificar la puesta en marcha inicial, la depuración y el funcionamiento del detector debido al menor número de canales de lectura y su sensibilidad intrínseca a la luz UV emitida por el xenón. En una segunda versión posterior se instrumentó el plano de trazas con 248 SiPM. La respuesta del detector se estudió bajo dos condiciones diferentes: una configuración ultravioleta (UVC) en la que el tubo de luz de PTFE no tenía revestimiento; y una configuración azul (BC) en la que los paneles se recubrieron con tetrafenil butadieno (TPB), para estudiar la posible mejora en la recolección de luz.

Sistema de gas

El sistema de gas de NEXT-DEMO es una versión simplificada del de NEW (figura 1.9). El procedimiento estándar durante el funcionamiento normal del detector comienza con la evacuación de la vasija a niveles de vacío de alrededor de 10^{-5} mbar, seguido de una purga de argón. Un segundo paso de vacío extrae el argón del sistema para después llenar el detector con gas xenón a presiones



Figura 1.8: El detector NEXT-DEMO y los sistemas auxiliares (sistema de gas, componentes electrónicos frontales y DAQ) en su ubicación en la sala semi-limpia en IFIC.

de hasta 15 bar. El xenón se puede recuperar criogénicamente en una botella de acero inoxidable conectada al sistema de gas sumergiéndola en un depósito lleno de nitrógeno líquido. Para ello el regulador de presión de la botella estará completamente abierto para permitir que el gas xenón fluya dentro de él (debido a la diferencia de temperatura) y se congele.

Vasija de presión

La vasija de NEXT-DEMO consiste en un cilindro de 3 mm de grosor, 30 cm de diámetro y 60 cm de longitud, cuyos extremos están soldados a bridas CF³. Se utilizan juntas planas de cobre como sellado en todas bridas para evitar fugas. La vasija fue certificada a una presión operativa de 15 bar. Fue diseñada en el IFIC por ingenieros mecánicos del experimento NEXT, y construida por Trinos Vacuum Systems, un fabricante nacional. Las mejoras adicionales, que incluyen

³Las bridas CF utilizan una junta de cobre y una brida de borde de cuchilla para lograr un sello de vacío ultraalto. El número que sigue a esta designación indica el diámetro interior del tubo en milímetros.

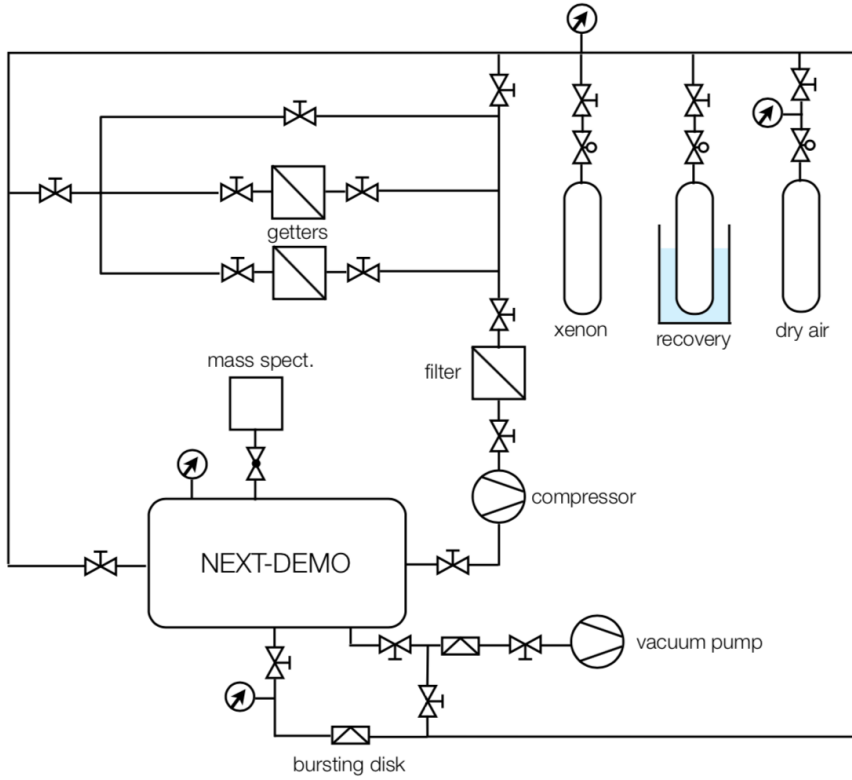


Figura 1.9: Esquema simplificado del sistema de gas de NEXT-DEMO.

la estructura de soporte y un sistema de railes para poder abrir y mover las tapas de los extremos, se realizaron en el taller mecánico del IFIC.

Cámara de proyección temporal

Las tres rejillas de alambre metálico, el cátodo, la puerta y ánodo, definen las dos regiones activas de la cámara (figura 1.10), la región de deriva de 30 cm de longitud, entre el cátodo y la puerta; y la región *EL* de 0,5 cm de longitud, entre la puerta y el ánodo. La puerta y el ánodo se construyeron con mallas de acero inoxidable con un área abierta de 88 % (hilos de $30\mu\text{m}$ de diámetro, 50 hilos/pulgada) sujetos en un marco circular con lengüeta y ranura con un anillo

tensor que se aprieta con tornillos para lograr la tensión óptima. El cátodo se construyó de manera similar sujetando los cables paralelos a 1 cm de distancia en otro marco circular en otro marco circular.

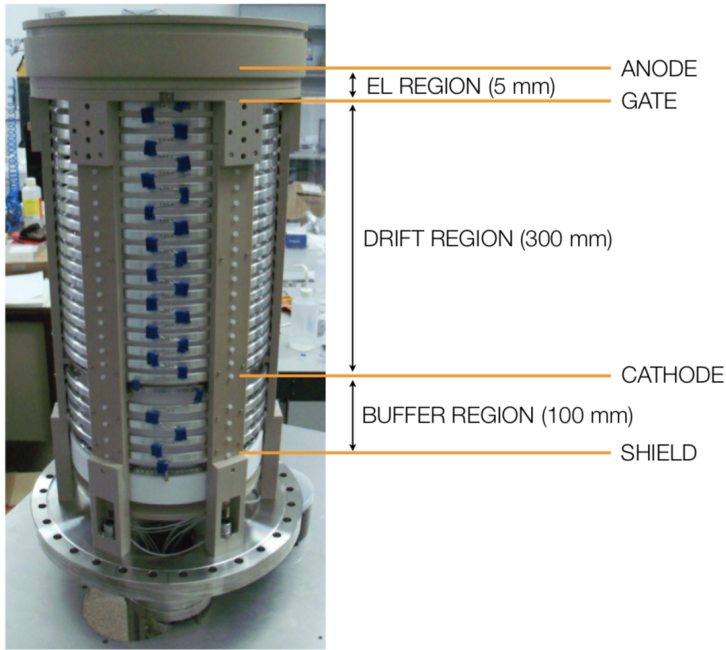


Figura 1.10: Vista externa de la cámara de proyección temporal montada en una tapa lateral. Se indican las posiciones aproximadas de las diferentes regiones de la TPC.

Planos de detección

En NEXT-DEMO, el plano de energía (figura 1.11, izquierda) estaba equipado con 19 PMTs Hamamatsu R7378A. Estos son PMTs de 1 pulgada, resistentes a la presión (hasta 20 bar) con una eficiencia cuántica de $\sim 15\%$ en la región ultravioleta (VUV). La cobertura de fotocátodo resultante del plano de energía era aproximadamente 39%. Los PMTs se insertaron en un soporte de PTFE siguiendo un patrón hexagonal. Una rejilla, utilizada como blindaje, similar al cátodo pero con los cables separados a 0,5 cm, se atornilla en la parte superior del soporte y se conecta a tierra. Como se explicó anteriormente, esto protege

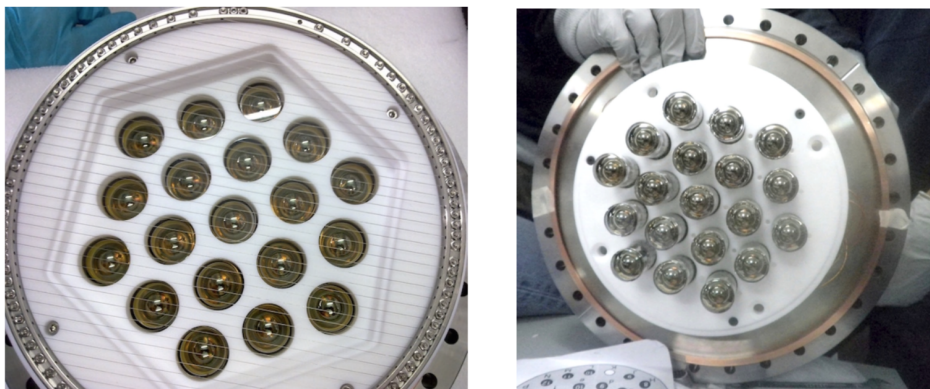


Figura 1.11: Los planos de energía (izquierda) y de trazas (derecha) de NEXT-DEMO, cada uno equipado con 19 PMTs Hamamatsu R7378A.

a los PMTs del alto voltaje en el cátodo, y asegura que el campo eléctrico en la región del *buffer* de 10 cm esté por debajo del umbral del efecto *EL*.

El primer plano de trazas del detector NEXT-DEMO que también utilizó 19 PMTs iguales a los del plano de energía (figura 1.11 (derecha)) funcionaba con una ganancia menor. También estaban sostenidos por un panel de PTFE, que refleja la luz al plano de energía. Las ventanas de los PMTs estaban ubicadas a 2 mm de la malla del ánodo. La reconstrucción de la posición se basa en la proporción de luz captada por los PMTs, (efecto *light sharing*), por lo que es mucho mejor que la distancia mínima entre los PMTs (35 mm de centro a centro).

1.3.2 NEW

NEXT-DEMO fue la prueba de concepto para el experimento NEXT, y aún es un banco de pruebas que puede ampliar nuestro conocimiento y comprensión. Y el llamado detector NEXT-100 será un detector radiopuro que comenzará a funcionar en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) en los próximos años.

Entre ellos encontramos el detector NEW (NEXT-White) que realmente es la primera etapa del experimento NEXT (figura 1.12). El objetivo principal de NEW

es proporcionar un paso intermedio en la construcción del detector NEXT-100 que permita la validación de las soluciones tecnológicas propuestas en el TDR [Álvarez y col. 2012b]. Además, NEW ha permitido medir la resolución a alta energía y la caracterización de la firma topológica de 2 electrones, midiendo el modo $\beta\beta 2\nu$ [P. Ferrario y col. 2019]. Finalmente, NEW ha permitido una evaluación realista del modelo de actividad de fondo de NEXT antes de la construcción del detector NEXT-100 [P. Novella y col. 2019].

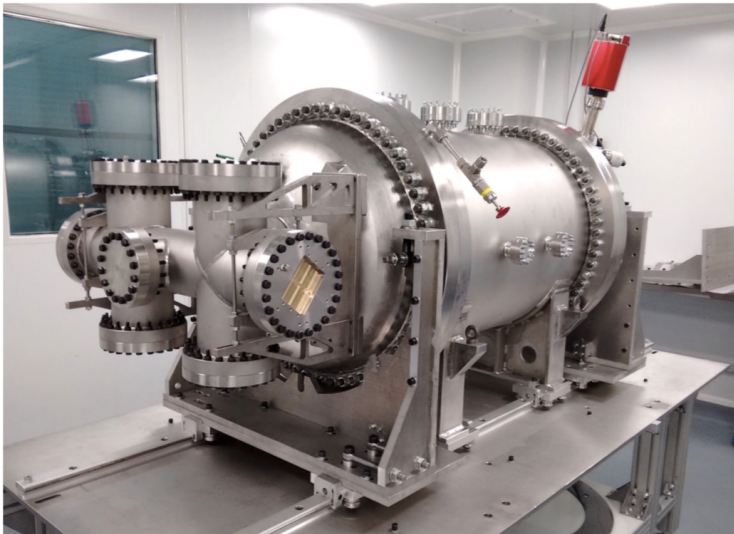


Figura 1.12: *Vasija del detector NEW.*

El sistema de gas

El sistema de gas utilizado para el detector NEW es casi el mismo que el de NEXT-100, porque ambos detectores tienen los mismos requisitos de gas, excepto para el volumen. De este modo, una vez que el detector NEXT-100 esté listo, las únicas partes que tendremos que cambiar son la vasija y los tanques de recuperación.

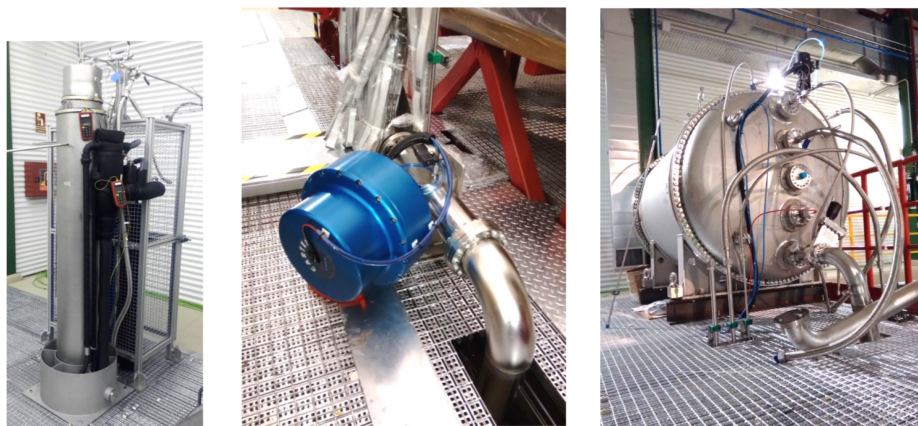
Las funciones del sistema de gas son: presurización y despresurización, recirculación y limpieza del xenón y el vaciado del detector. Su fiabilidad debe

de ser muy elevada debido al enorme coste del xenón enriquecido, por lo que el sistema de gas se ha convertido en un subsistema crítico. Dado que no es el objetivo de la tesis, sólo se describirán algunas partes.

El nivel de fiabilidad de necesario no se puede lograr sólo con componentes pasivos, porque hay algunas decisiones que requieren un mínimo de "inteligencia". Por esta razón, el sistema de gas ha sido completamente automatizado, utilizando un Compact RIO de la compañía National Instruments (un controlador embebido de alto rendimiento que cuenta con módulos de entrada/salida industrial, extrema robustez, certificaciones estándares en la industria y capacidad integrada de visión, movimiento, comunicación industrial e interfaz humano-máquina), éste es un sistema basado en FPGA (circuito integrado digital programable compuesto por bloques lógicos configurables y puertos de entrada/salida, cuya interconexión y funcionalidad puede ser programada mediante un lenguaje de descripción especializado). El Compact RIO ejecuta una variante de LabVIEW en tiempo real, tiene conexiones para monitorizar todo el sistema (manómetros, medidores de vacío, válvulas, compresores, enfriadores ...) y actúa abriendo y cerrando adecuadamente las válvulas que controlan el flujo de gas. El Compact RIO también está conectado a la red de *slow control*⁴, por lo que todas las lecturas pueden emplearse para generar informes, alarmas, etc. e interactuar con los otros elementos conectados a esta red, como se explica más adelante. Para el vaciado, el procedimiento estándar permite licuar el gas almacenado en todo el sistema utilizando una botella personalizada de crio-recuperación. Esta botella posibilita un enfriado con nitrógeno líquido, lo que permite una recuperación del gas debido por efecto de la despresurización. Posteriormente se utiliza una bomba de vacío para recuperar el gas residual en el recipiente y en el resto de las tuberías.

Sin embargo este método es demasiado lento en caso de emergencia, por ejemplo debido a una fuga en el sistema. Para eso necesitamos un tanque de recuperación. Este tanque se mantiene a un vacío moderado y su volumen se calculó para mantener todo el gas del experimento a ~ 1 bar. Después, durante el funcionamiento normal, si se detecta una anomalía y el gas quedara

⁴Slow control es el nombre que recibe el sistema que controla y monitoriza todo el experimento, y que contiene desde los ordenadores con el software de control hasta el último sensor.



(a) Botella de crio-recuperación. (b) Valvula Carten conectada al plano de trazas para la evacuación. (c) La vasija de NEXT-100 utilizada como tanque de recuperación.

Figura 1.13: Diferentes partes del sistema de gas de NEW involucrado en la recuperación del gas.

comprometido se abriría automáticamente una válvula grande de asiento (Carten ref. HBA4000-083-PC2-NC-PSEx-SO) (figura 1.13b) y el gas fluiría rápidamente desde la vasija al tanque a través de un tubo de 4 pulgadas. Una vez allí, el gas podría ser redirigido a la botella de crio-recuperación para almacenarse de manera segura. Como se muestra en la figura 1.13c, durante la operación de NEW, la vasija de NEXT-100 se utiliza como tanque de recuperación, ya que tiene el volumen idóneo para esta función y permite un ahorro en costes.

El compresor para la recirculación de gas figura 1.16b fue construido por la compañía SERA, de acuerdo con nuestros requisitos específicos de presión, fiabilidad y tasa de fugas. Como el compresor debe estar funcionando continuamente durante largos períodos de toma de datos, éste debe ser refrigerado para garantizar su rendimiento. Para ello está conectado a un dispositivo enfriador, que se controla automáticamente mediante el Compact RIO cada vez que el compresor es arrancado.

En figura 1.14a se muestra el marco del sistema de gas. Aquí se ubican la mayoría de las válvulas manuales, aquellas demasiado críticas para confiar en un sistema

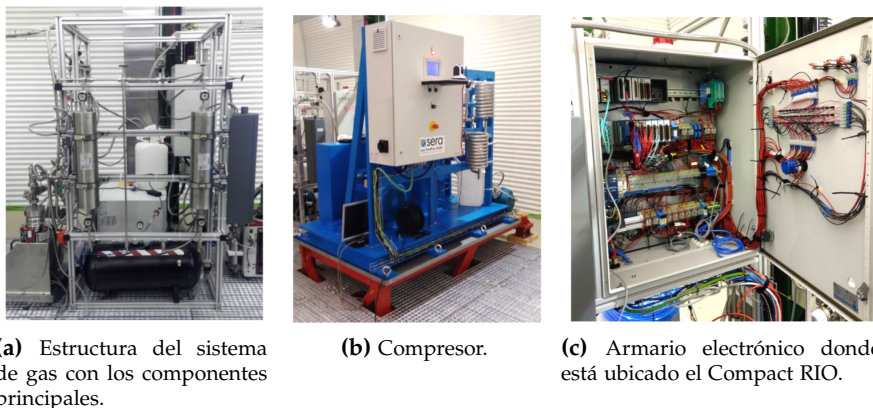


Figura 1.14: Diferentes partes del sistema de gas de NEW involucrado en la recirculación del gas.

automatizado, tubos para redireccionar el flujo de gas y los *getters*. Estos *getters* se utilizan, para limpiar el gas de las impurezas que deterioran la medición de energía en el detector. Se utilizan dos tipos de *getters*: los *cold getters*, que limpian el gas de O_2 , H_2O , CO , H_2 , ácidos volátiles, compuestos orgánicos refractarios y bases volátiles; y el *hot getters*, cuyos niveles de impureza de salida para O_2 , H_2O , CO , CO_2 , H_2 , N_2 y CH_4 se reducen a niveles de partes por billón (ppb) o inferiores. También, para propósitos de limpieza de gas, varias bombas de vacío están distribuidas y conectadas en algunos puntos del sistema. Esto permite tener todo el sistema de gas a vacío, lo que es deseable para limpiar todas las tuberías, válvulas y volúmenes antes de que se introduzca el gas limpio; y también permite encontrar fugas en el sistema. Además, se conecta una bomba de vacío adicional al volumen del plano de energía porque, como se explicará, toda esta cavidad necesita un buen nivel de vacío para que los PMTs operen de manera segura y se permita una detección de fugas más sencilla.

Vasija a presión

La vasija a presión de NEW ha sido fabricada con la misma aleación de acero 316Ti seleccionada para el detector NEXT-100, de la compañía Nironit [Aprile y col. 2011b] [Maneschg y col. 2008]. La figura 1.12 muestra la vasija a presión antes de colocarla en la plataforma de operación. La figura 1.15 muestra la sección transversal de la vasija, con sus partes internas.

Con un diámetro interno de 64 cm y una longitud de 950 cm, las dimensiones de NEW son intermedias entre NEXT-DEMO y NEXT-100. Por diseño, la vasija a presión puede contener hasta 50 bar, y cuenta con la certificación CE de 20 bar. Por requerimientos de blindaje, dentro de la vasija se sitúan barras de cobre de 6 cm de espesor, que cubren todo el cilindro. Las barras están diseñadas con un perfil escalonado, de modo que cada una coincida con las barras adyacentes. De esta manera no hay caminos rectos para que las partículas externas entren en el volumen activo. Además, como puede verse en la figura 1.15, ambos planos de detección tienen platos de cobre con un grosor de 12 cm. Esto asegura que todo el volumen activo esté adecuadamente protegido en cualquier dirección. Sin embargo, hay algunas aberturas en el cobre (puertos), colocadas para permitir la calibración del detector utilizando fuentes radiactivas desde fuera de la vasija.

Cámara de proyección temporal (TPC)

Field Cage

El diseño de la caja contenedora de campo (*field cage*) de NEW se basa en una carcasa cilíndrica de polietileno de alta densidad (HDPE), de 25 mm de espesor, que aísla el blindaje de cobre del voltaje en los anillos de cobre y el cátodo. Los anillos se colocan dentro de las ranuras y se conectan mediante abrazaderas de cobre a una cadena de resistencias. La *field cage* tiene un diámetro exterior de 500 mm y una longitud de 500 mm. La región de deriva en xenón de alta presión necesita un campo eléctrico moderado (300 – 600 V/cm), por lo que se prevé una tensión máxima de 30 kV en el cátodo. Este campo eléctrico es suficiente para evitar la recombinación de electrones en el gas y desviar las cargas hacia

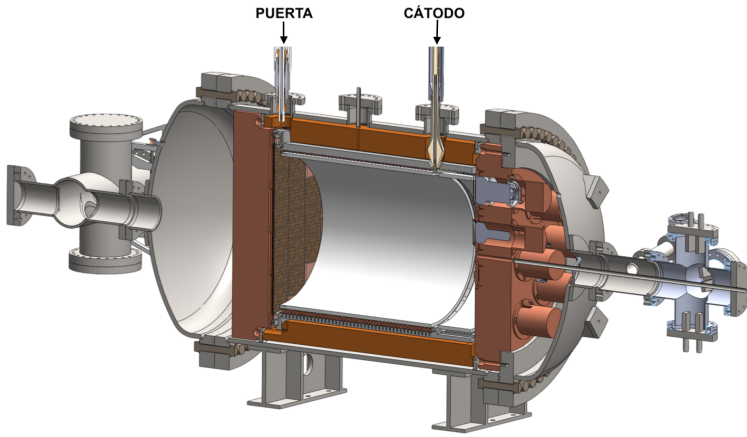
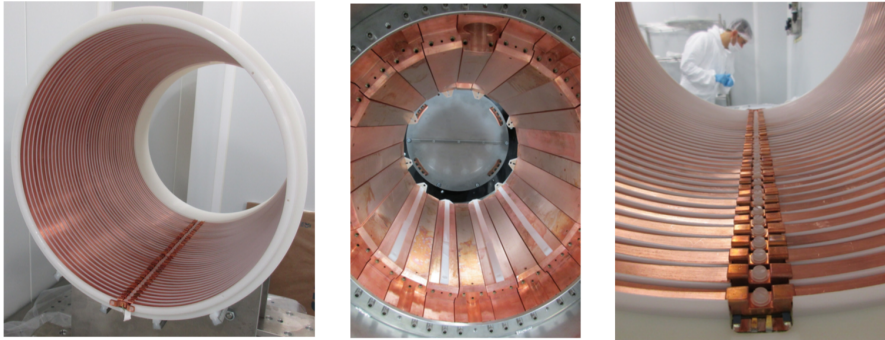


Figura 1.15: Vista en sección del detector NEW. El plano de trazas (izquierda) tiene 28 tarjetas electrónicas con SIPM para la reconstrucción de trazas, y el plano de energía (derecha) tiene 12 PMTs para la medición precisa de energía.

el ánodo. Por otro lado, el campo en la región de deriva debe ser altamente uniforme y homogéneo, tratando de evitar cualquier componente radial. Esas características son obligatorias para evitar pérdidas de carga en las paredes durante el proceso de deriva.

Los anillos en la región de deriva están fabricados cobre electrolítico cuya sección es un rectángulo redondeado de $10 \times 3 \text{ mm}^2$ con un radio de 0,5 mm en los bordes. Los anillos se insertan en ranuras dentro del cuerpo de polietileno de alta densidad de la *field cage*. Estas ranuras tienen una profundidad de 4 mm, lo que permite un cierto espacio entre la superficie del anillo y la pared de la *field cage* que es necesario para soportar el tubo de luz dentro de la *field cage*.

Con el objeto de simular la distribución del campo eléctrico en la *field cage* (figura 1.17), se utilizó el software de elementos finitos COMSOL Multiphysics. Este estudio realizado por el equipo de ingeniería de NEXT, permitió controlar las variaciones del campo eléctrico en las regiones más críticas.



(a) *Field cage* antes de ser instalada (b) Soportes de HDPE para mantener la *field cage* en su sitio. (c) Detalle de los anillos de cobre sujetos a la cadena de resistencias.

Figura 1.16: Diferentes detalles de la *field cage* durante el montaje.

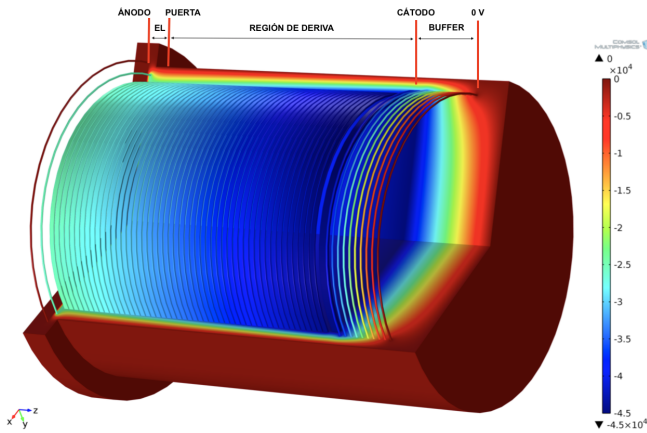


Figura 1.17: El campo eléctrico de la *field cage* de NEW se simuló utilizando el software de elementos finitos (COMSOL Multiphysics).

Cátodo

En el lado del plano de energía la *field cage* termina con una rejilla de cátodo transparente (figura 1.21a), colocada a 100 mm de los PMTs. El cátodo es la sección con el voltaje negativo de mayor módulo, de forma que la diferencia entre la puerta y el cátodo es positiva, provocando el desplazamiento de los

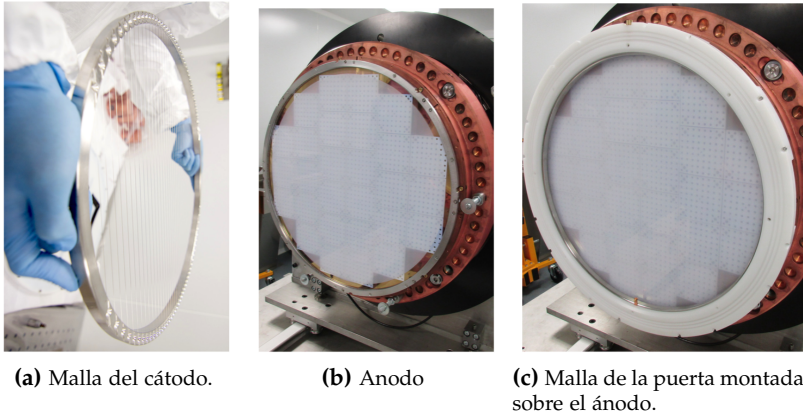


Figura 1.18: Cátodo, ánodo y puerta, durante la instalación en Junio de 2016.

electrones hacia el ánodo. Allí se sitúa la EL y el plano de trazas. Además del campo eléctrico que se produce hacia la puerta, también se produce otro hacia los PMTs a lo largo de lo que hemos denominado el *buffer*. El *buffer* es necesario para degradar el potencial eléctrico del cátodo a cerca de cero voltios en la superficie de la ventana del PMT. En esa región de la TPC no exigimos que el campo eléctrico sea altamente uniforme y, por lo tanto, son posibles diferentes opciones de degradación. El diseño actual degrada el voltaje sin usar anillos, tratando de evitar las regiones de campos eléctricos cerca de la ruptura. Para proteger los PMTs contra el campo eléctrico, sus ventanas están recubiertas con ITO (óxido de indio-estaño), una molécula conductora transparente. El polietileno en la región del *buffer* es ligeramente más delgado (15 mm) que en la región de deriva para dar suficiente espacio para introducir el cátodo dentro de la *field cage*.

Puerta & la región EL

La solución para la región *EL* es usar una mezcla entre una malla para la puerta (figura 1.18c) y una placa de cuarzo sólido (silicio fundido) recubierto con óxido de indio-estaño (ITO) como ánodo (figura 1.18b). Este recubrimiento da como resultado una capa conductora de transparencia de $\sim 90\%$ que permite fijar un

voltaje en la superficie de la placa de cuarzo y luego crea un campo homogéneo en la región *EL*. La placa de cuarzo debe recubrirse con TPB para cambiar la luz VUV de la electroluminiscencia de xenón a azul, para que la detecten los SIPMs del plano de trazas.

La solución de la placa de cuarzo tiene múltiples ventajas. Primero, protege a los SiPMs de chispas y luego no hay necesidad de recubrirlos. En segundo lugar, elimina la necesidad de tensión y resistencia en un lado de la malla, solo se necesita un pequeño anillo que rodea el borde del recubrimiento de ITO para evitar los bordes afilados de la capa conductora. Por último, la producción de la placa de cuarzo es más sencilla y económica que la malla.

Tanto el ánodo como la puerta se ensamblan en el plato de cobre del plano de trazas, por lo que la distancia entre el ánodo y los SiPM se puede ajustar con precisión. Un contacto de muelle en la puerta lo conecta eléctricamente a la *field cage*.

Cadena de resistencias

La cadena de resistencias tiene dos propósitos: mantener mecánicamente los dos lados de los diferentes anillos y conectarlos electricamente mediante resistencias. De este modo, se crea un divisor de voltaje y el potencial se degrada uniformemente.

La cadena de resistencias de NEW (figura 1.20) se montó en una placa de *CuFlon*⁵ que conectará cada anillo con el siguiente y también el cátodo y la puerta sus anillos más cercanos. Las resistencias deben soportar alto voltaje y su tolerancia debe ser mínima para garantizar la homogeneidad en el campo eléctrico. En lugar de utilizar una sola resistencia entre los anillos, se han montado dos resistencias paralelas de $1\text{ G}\Omega$ para salvaguardar posibles fallos. La selección del valor nominal y tecnología de la resistencia debe de garantizar que la capacidad e inductancias parásitas no degraden su valor efectivo.

⁵CuFlon consiste en un dieléctrico de PTFE puro que ha sido revestido de cobre utilizando el proceso patentado de la compañía Polyflon.

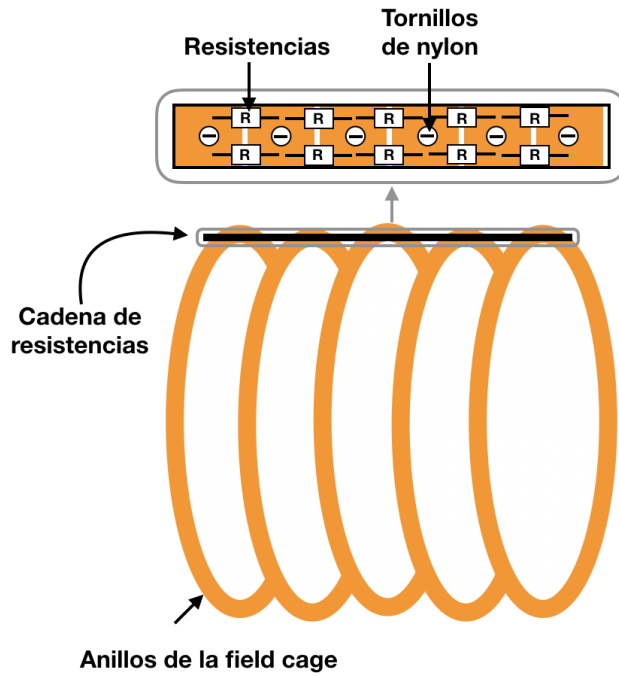


Figura 1.19: Diagrama esquemático de la cadena de resistencia de NEW

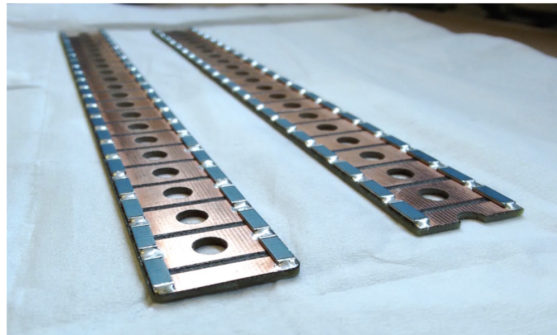


Figura 1.20: Cadena de resistencia de NEW en dos piezas antes del montaje en la field cage. La cadena mostrada es el primer prototipo FR4, hecho para probar el rendimiento de la field cage antes de producir la cadena de resistencias final.

La selección de las resistencias fue una tarea complicada, ya que debían de cumplir diversas especificaciones de distintos tipos. El elevado campo eléctrico necesario obliga a que las resistencias sean capaces de soportar altas tensiones nominales. Por otra parte el espacio disponible entre anillos es limitado y por lo tanto su tamaño debe ser reducido. Y lo que es más restrictivo, dado que se encuentran directamente en el volumen activo del experimento su radioactividad natural debe ser la mínima posible para cumplir con los criterios de radiopureza. Para seleccionar las mejores resistencias, varios modelos fueron medidos por el equipo de radiopureza de NEXT en el LSC. Al final el modelo elegido fue HVF2512T1007FE de la compañía Ohmite, las cuales cumplían con todos los requisitos.

Pasamuros de alto voltaje

Los voltajes necesarios para trabajar en NEW son aproximadamente 7,7 kV para la puerta y aproximadamente 28,9 kV para el cátodo. La alta tensión se suministra al cátodo y la puerta a través de pasamuros de alto voltaje (HVFT) hechos a medida contruidos presionando una varilla de acero inoxidable en un tubo de Tefzel (un plástico con alta resistencia dieléctrica), que después se sujeta con un plástico a una brida CF. Fueron probados a alto vacío y a 100 kV sin fugas ni arcos eléctricos.

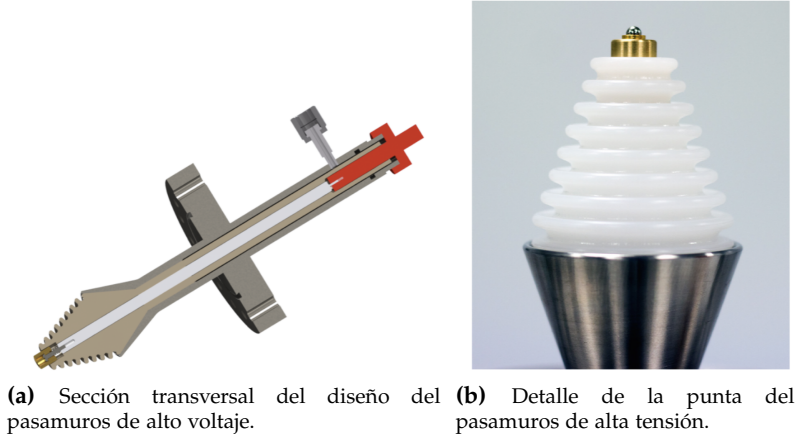


Figura 1.21: Pasamuros de alto voltaje diseñados para NEW.

Los pasamuros se han rediseñado completamente para garantizar su funcionalidad a 50 kV considerados como el requisito máximo para el correcto funcionamiento. El diseño se basa en una idea original de *H. Wang* presentada en el taller "Alto voltaje en líquidos nobles para física de alta energía", realizado en *Fermilab* [Rebel y col. 2014] .

Tubo de luz

El tubo de luz (figura 1.22) consiste en un cilindro hueco de PTFE, colocado dentro de la *field cage*. Es la parte más interna del detector, donde se producen los eventos de interés. Los paneles del tubo de luz se recubrieron con tetrafenil butadieno (TPB), para optimizar la recolección de luz. Debido al gran tamaño de las piezas, el recubrimiento se realizó en las instalaciones del *Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)* por los miembros de la colaboración NEXT.

El tubo de luz tiene un diámetro interior de 416 mm y una pared de solo 10 mm. El tubo de luz no necesita ninguna fijación a la *field cage* ya que se soporta por fricción.

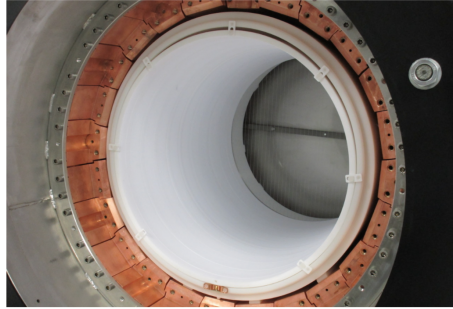


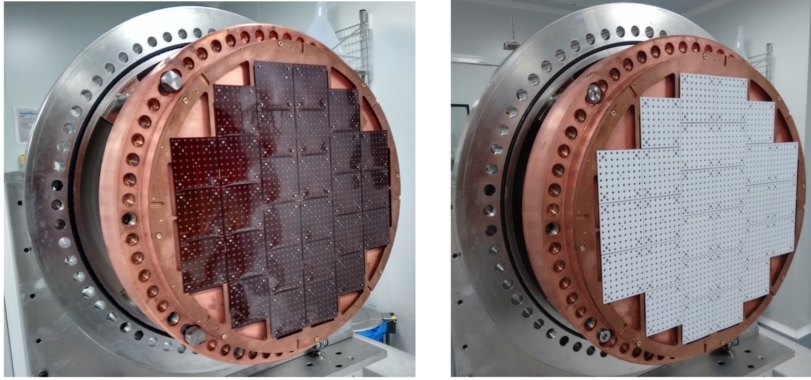
Figura 1.22: *Tubo de luz de NEW, fabricado de PTFE.*

Plano de trazas

El plano de trazas de NEW consiste en 28 tarjetas electrónicas de Kapton (llamadas *Dice-boards*). Cada una de ellas tiene una matriz de 8×8 SiPM colocada con un paso entre ellas de 1 cm, un sensor de temperatura NTC y cuatro LEDs para calibración. Las *Dice-boards* cubren la región fiducial con ~ 1800 SiPM, asegurando que no haya regiones muertas. El conector se encuentra al final de un cable largo y se protege del gas, en el volumen fiducial, por un apantallamiento con un plato de cobre de 120 mm de espesor [Monrabal y col. 2018].

Las primeras *Dice-boards* (DB) desarrolladas para NEXT-DEMO estaban hechas de *CuFlon* multicapa, y su nivel de radioactividad era moderadamente alto, debido al adhesivo necesario para pegar las capas. Además de este problema, los SiPM de las DB debían de soldarse manualmente (ya que el *CuFlon* no tolera las temperaturas de un horno) y necesitaban de conectores, la mayoría de los cuales se sabe que no son radiopuros [Alvarez y col. 2013].

Las tarjetas electrónicas para NEW resuelven todos los problemas anteriores. Ya que el material es Kapton, y el nivel de radioactividad medido (solo límites superiores) es un orden de magnitud menor que en las *Dice-boards* anteriores. Además, el TPB no se aplica directamente sobre la superficie de la tarjeta, ya que el diseño de la región de electroluminiscencia (EL) con un plato de cuarzo permite un revestimiento directo del mismo en lugar de realizarse sobre las *DICE-boards* individuales.



(a) Instalación del plano de trazas en Noviembre de 2015. (b) Actualización del plano de trazas con máscaras de PTFE en Abril de 2016.

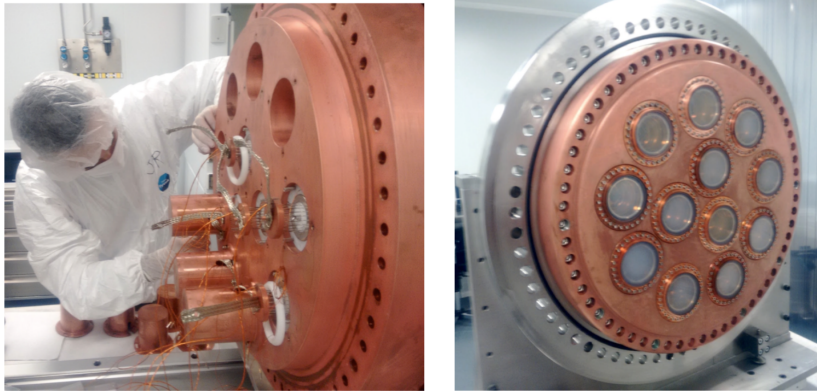
Figura 1.23: Plano de trazas de NEW.

Para mejorar la reflectividad del plano de trazas y poder recoger más luz sobre el plano de energía, las *Dice-boards* se cubrieron con máscaras de teflón (PTFE), como se muestra en la figura 1.23b, algunos meses después de la instalación inicial.

Plano de energía

El diseño del plano de energía (se muestra en la figura 1.24) consiste en un plato de cobre de 12 cm de grosor con 12 aberturas cubiertas con ventanas de zafiro soldadas a marcos de cobre. Dichas ventanas son atornilladas frontalmente al plato. La configuración completa sella el recipiente a presión de la tapa torisférica que se mantendrá a niveles de vacío de $\sim 10^{-4}$ mbar.

Se colocará un blindaje de cobre adicional (ver figura 1.24a) en el lado de vacío de las aberturas para evitar que la radiación gamma atravesase los PMT y entre en el volumen activo del detector. Los 12 PMTs R11410-10 de *Hamamatsu* se acoplan ópticamente a la ventana de zafiro utilizando NyoGel OCK-451 y se mantienen en su lugar mediante una abrazadera y un resorte de HDPE.



(a) Vista trasera del plano de energía instalado. Los PMTs están localizados dentro de los agujeros, y cubiertos con un blindaje de cobre llamado "hat" de 12 cm de cobre. (b) Vista frontal del plano de energía. Ventana de zafiro que aísla vacío de presión.

Figura 1.24: Plano de energía de NEW durante la instalación en Julio de 2015.

Para mejorar la captación de la luz, las ventanas de zafiro se recubrieron con TPB. Para proteger los PMTs del campo eléctrico de la TPC, las ventanas también se recubrieron con una capa conductora de ITO, en contacto a la ventana de cobre, que a su vez está conectada a tierra a través de la vasija.

Los PMTs se alimentan con alta tensión, y la señal que generan se extrae a través del mismo trío de cables de kapton trenzados, conectados a un pasamuros personalizado en la cabeza torisférica. El pasamuros fue fabricado por la compañía Alletra. La distribución de la señal, y la alimentación de cada PMT individual se controla a través de la tarjeta de circuito impreso de Kapton (base), que tiene el divisor de resistencias para alimentar adecuadamente los díodos del PMT. Posteriormente se detallará el proceso de diseño de los circuitos de las bases de los PMT.



(a) Uno de los PMTs R11410-10 de Hamamatsu. (b) Base de Kapton rellena con epoxy térmica radiopura.

Figura 1.25: PMT y su base de polarización utilizados en NEW.

Electrónica y sistema de adquisición (DAQ)

Desde el inicio del experimento NEXT, se consideró que la electrónica debía ser fácilmente escalable y compatible con todas las etapas del detector. Por lo tanto, la mayoría de los componentes electrónicos son versiones mejoradas de la primeras etapas de NEXT-DEMO.

Para entender la electrónica, es importante tener en cuenta que la señal de los fotomultiplicadores de silicio del plano de trazas es una señal integrada en ventanas de tiempo discreto, mientras que la señal de los PMTs del plano de energía es continua y se muestrea a una tasa de 40 MHz. Este último aspecto es especialmente relevante cuando se trata de la electrónica relacionada con el plano de energía y el sistema de adquisición. El motivo de utilizar esta aproximación se debe a la cantidad de canales en juego. Para el EP se desea conservar la forma de onda por motivos de análisis y configuración del modo de arranque de la adquisición, mientras que en el TP la densidad de canales es mucho mayor e imposibilita una adquisición continua.

En el caso de la electrónica de acondicionamiento del plano de energía (las tarjetas denominadas Front-end (FEE)), una vez que la señal ha sido tratada en el FEE, se envía en modo diferencial a las tarjetas ADC a través de un cable HDMI. Allí, las señales se digitalizan y se procesan posteriormente.



Figura 1.26: Los armarios electrónicos de NEW. Desde la izquierda, los ordenadores y los servidores, el plano de energía y el armario del plano de trazas. A cada lado de los armarios hay un SAI (Sistema de Alimentación Ininterrumpida), capaz de alimentar todo el sistema hasta 40 minutos en caso de una fallo eléctrico.

En lo que respecta a la electrónica del plano de trazas, cada tarjeta de FEE tiene una FPGA Virtex-6 XC6VLX130T que lee datos de hasta sesenta y cuatro ADCs de 1 MSa/s, da formato a los datos, y los almacena en un *buffer* circular de doble evento de longitud reconfigurable para así evitar el tiempo muerto. Cuando se recibe un disparo “*trigger*”, los datos sin ceros se leen y envían a la etapa superior. El *buffer* circular se implementa con los recursos internos de la FPGA y puede almacenar dos eventos completos en modo *raw*, es decir, los datos directos sin ningún tipo de procesamiento, cuyo tamaño máximo corresponde a aproximadamente el doble del tiempo máximo de deriva del detector (hasta 3,2 ms).

Los parámetros de ajuste de línea base y supresión de ceros se pueden configurar a través de un conjunto de comandos. En el modo de supresión de ceros, el sistema se activa cuando la señal supera el valor sobre la línea de base fija durante al menos el número mínimo de muestras. Después, esta señal se envía

con sus muestras previas y posteriores. El modo de operación de datos *raw*, donde no se produce la supresión de ceros, también se admite con fines de prueba.

Las tarjetas FEE del plano de trazas y plano de energía conectan con los módulos de interfaz DAQ del Sistema de lectura escalable (SRS) [Esteve y col. 2016] (probado tanto en FECv3 como en el nuevo FECv6) a través de la especificación de enlace SRS DTCC (Data, Trigger, Clock and Control) sobre cobre [Martoiu y col. 2013]. En este enlace, los datos, el *trigger*, el reloj y los *slow control* van por el mismo conector RJ-45 o HDMI en 4 pares de LVDS. *ALICE'S DATE* [Carena y col. 2014] se utiliza como entorno de software DAQ. Como resultado, los componentes electrónicos FEE son totalmente compatibles con los componentes electrónicos del SRS del CERN de la colaboración RD-51 [Esteve y col. 2016]. La configuración del DTCC utilizada es la básica. El enlace se ha probado completamente hasta 250 Mbps en los dos pares de datos utilizando cables de cobre SFTP 6A de 1 metro.

Slow Control

Obviamente, un experimento con tanta complejidad como el detector NEW necesita un sistema de control avanzado. Eso es lo que hemos llamado *Slow control* (SC).

Con el *slow control*, hemos creado una red interna que conecta todos los subsistemas y dispositivos involucrados en el experimento, y agrega una inteligencia que mantiene el sistema seguro y actúa para prevenir y resolver problemas de inmediato. En la figura 1.27 se muestran las pantallas de control. Sin entrar en mayor detalle, hay 6 programas diferentes conectados al experimento:

- *HHV*: Monitoriza y controla la tensión en el cátodo y la puerta de la *field cage*. Detecta las chispas y recupera o apaga el sistema de acuerdo con los parámetros establecidos.
- *Gas System*: Controla todos los parámetros relacionados con el sistema de gas: válvulas, presión, vacío, compresor, *getters*, bombas de vacío, RGA,

etc. Como el sistema de gas se definió como crítico, casi toda intervención manual está prohibida porque el sistema es autónomo. Sin embargo, se puede hacer una parada de emergencia a través del *slow control*.

- *PWR*: Supervisa y controla todas las fuentes de alimentación que alimentan la electrónica en el experimento, incluidas las fuentes personalizadas de polarización para SiPM.
- *PMT*: Monitoriza y controla la fuente de alimentación de los PMTs, detecta sobrecorrientes y controla también la bomba de vacío conectada al volumen del plano de energía.
- *Sensors*: Controla las temperaturas y otros parámetros importantes de la electrónica y las computadoras DAQ. Controla también los contactores que alimentan casi todos los equipos y componentes electrónicos.
- *Main*: Este *slow control* recibe los parámetros y las advertencias principales de los otros programas, por lo que el *shifter*⁶ sabe si todo funciona correctamente solo con mirar el este programa. También tiene un botón de emergencia, que detiene todo para evitar daños, además se pueden encender de forma remota los demás ordenadores del *slow control* en caso de ser necesario.

Cada uno de los programas del *slow control* también genera informes, incluyendo todos los eventos registrados para cada subsistema y los principales parámetros medidos. Además se envían correos electrónicos al *shifter*, con advertencias o alarmas producidas, para que pueda actuar tan pronto como sea posible.

Durante el desarrollo de la tesis se ha realizado la implementación completa de las aplicaciones para la monitorización y control del EP: desde la conexión vía servidor OPC (OLE for process control) con la fuente de alimentación de alta tensión hasta el diseño del panel frontal. También se ha participado en el desarrollo del resto de aplicaciones de control relacionadas con el resto de partes del experimento.

⁶Shifter es la persona encargada de hacer el turno de supervisión del detector.



Figura 1.27: *Slow Control del experimento NEXT.*

Castillo de plomo

Para proteger a NEW (y NEXT-100 en el futuro) del flujo externo de rayos gamma de alta energía, se ha elegido un castillo de plomo (figura 1.28), principalmente debido a su simplicidad y efectividad. La pared de plomo tiene un grosor de 20 cm, y está hecha de capas de ladrillos de plomo escalonados sostenidos con una estructura de acero.

Los ladrillos de plomo tienen dimensiones estándar ($200 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$) y, según los requisitos, una actividad en uranio y torio inferior a $0,4 \text{ mBq/kg}$. El castillo principal está hecho de dos mitades montadas en un sistema de ruedas que se mueven sobre rieles con la ayuda de motores eléctricos. El castillo móvil tiene una posición abierta y una cerrada. La primera se utiliza para la instalación y en las intervenciones de la vasija a presión; la última posición se utiliza en el funcionamiento normal. Un sistema de cierre fija el castillo al suelo en cualquiera de las dos configuraciones para evitar desplazamientos accidentales. En ambos lados del castillo, donde se sellan las dos mitades, hay puertas móviles. Estas puertas también están hechas de ladrillos de plomo, y se pueden desplazar para ofrecer espacio de trabajo (en la posición abierta) y para proteger la unión entre las dos mitades del castillo (en la posición cerrada). Debido a la leve actividad sísmica de la parte de los Pirineos donde se encuentra el LSC, el castillo de plomo se monta en una estructura sísmica para aislarlo de posibles vibraciones del suelo. Por lo tanto, el castillo de plomo no está unido mecánicamente a la



Figura 1.28: Castillo de plomo del experimento NEXT. El detector NEW antes de la instalación de tuberías y cableado.

plataforma de trabajo, y todas las conexiones eléctricas y de gas son flexibles entre estas estructuras separadas.

1.3.3 NEXT-100 y más allá

El experimento NEXT fue formalmente propuesto al *Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)* en 2009 en una carta de intención [Granena y col. 2009]. El diseño del detector fue plasmado en un informe conceptual de diseño (CDR) [Álvarez y col. 2011] publicado en 2011, y concretado un año después en un informe de diseño técnico (TDR) [Álvarez y col. 2012c].

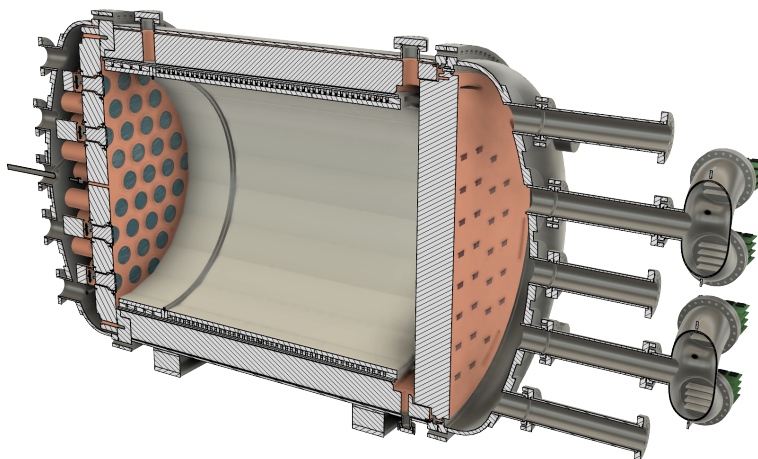


Figura 1.29: Vista transversal del detector NEXT-100. El volumen activo está apantallado de la radiación externa con al menos 12 cm de cobre en todas las direcciones

Como se explicó anteriormente, NEW es una versión reducida de NEXT-100 con las mismas tecnologías. A continuación se detallarán las diferencias entre ambos detectores:

- **Vasija a presión:** La vasija a presión NEXT-100, que se muestra en la figura 1.29, consta de una sección central cilíndrica de 160 cm de longitud, 136 cm de diámetro interior y 1 cm de espesor de pared, y dos tapas torisféricas idénticas de 35 cm de altura, 136 cm de diámetro interior y 1 cm espesor de la pared. Se ha fabricado con acero inoxidable tipo 316Ti debido a sus bajos niveles de contaminantes radiactivos naturales.
- **Field cage:** El cuerpo principal de la *field cage* es un cilindro abierto de polietileno de alta densidad (HDPE) de 148 cm de longitud, 107,5 cm de diámetro interior y 2,5 cm de espesor de pared que proporciona rigidez estructural y aislamiento eléctrico. Una serie de anillos de cobre para la configuración del campo eléctrico se fijan a la superficie interna del cilindro, soldados a una cadena de resistencias que fija el voltaje de cada anillo. Los anillos están cubiertos por azulejos de PTFE recubiertos con

TPB para cambiar la luz VUV de xenón a azul y mejorar la eficiencia de la recolección de luz. Uno de los extremos del cilindro de HDPE está cerrado por una ventana de silicio fundido de 1 cm de grosor. La superficie interna de la ventana funciona como el ánodo TPC gracias a un revestimiento transparente conductor (ITO) y también permite un desplazamiento de la longitud de onda de la luz emitida por el xenón mediante un recubrimiento de TPB.

Los otros dos electrodos de la TPC, la puerta, *EL* y el cátodo, están ubicados a una distancia de 0,5 cm y 106,5 cm del ánodo, respectivamente, y están contruidos con una malla de alambre de acero inoxidable altamente transparente estirada sobre marcos circulares.

- Plano de energía: El plano de energía de NEXT-100 estará compuesto por 60 PMTs R11410-10 de Hamamatsu ubicados detrás del cátodo de la TPC y que cubren aproximadamente el 30 % de su área. El plato de cobre y los elementos mecánicos del plano de energía tienen la misma estructura que NEW, adaptados al tamaño más grande del detector.
- Plano de trazas: El plano de trazas tendrá la misma estructura que NEW, pero el número de *DICE-boards* se incrementa a 112, lo que da un total de una matriz de 7168 SiPMs. Como consecuencia del mayor número de SiPMs, es necesario aumentar la densidad de terminales de los conectores.
- Electrónica: Como la electrónica diseñada para el experimento NEXT es completamente escalable, no hay grandes cambios en este subsistema. Necesitará un mayor número de tarjetas electrónicas (~ 5 veces más tarjetas de FEE) y el sistema DAQ se escalará en consecuencia.
- Sistema de gas: El volumen de gas en NEXT-100 es más grande, pero los componentes principales utilizados fueron los mismo que originalmente se diseñaron para NEW. La principal diferencia es el tanque de recuperación de emergencia, que es 10 veces más grande que el usado anteriormente, debido al mayor volumen de gas empleado.

"Lo que más amo de la ciencia es que a medida que aprendes, realmente no obtienes respuestas, solo tienes mejores preguntas."

– John Green

2

Motivación y objetivos de la tesis

2.1 Motivación

2.2 Metodología de diseño integrada con las simulaciones físicas

Desde el inicio del planteamiento de la tesis, se orientó al trabajo siguiendo una perspectiva de desarrollo integrado que permitiera una simulación completa a alto nivel para poder verificar en todo momento su evolución. Por lo tanto se adoptó la metodología *TOP-DOWN* como filosofía de desarrollo que posibilitara una simulación individual e integrada de todos los elementos.

Efecto de la electrónica. En cuanto al efecto de la electrónica asociada al plano de energía, éste puede ser separado en dos categorías: las bases de polarización y la electrónica de acondicionamiento (*front-end*). El diseño de la electrónica de acondicionamiento se apoyará en la simulación mediante el programa LTspice® de la compañía Analog devices©. Se prestará especial atención al problema derivado del efecto del condensador de acoplo encargado de eliminar el nivel de tensión asociado a la señal de corriente obtenida del PMT .

En el caso de las bases de polarización, su interacción con el resto del sistema es compleja y difícil de modelizar, especialmente su efecto sobre la linealidad del conjunto, por lo que se diseñará un sistema de prueba para garantizar las especificaciones impuestas por el proyecto.

Algoritmos de reconstrucción de la señal. Debido a las características de longitud temporal y forma de las señales provenientes del plano de energía, el efecto del condensador de acoplo es difícilmente subsanable mediante circuitos analógicos. Por ello se planteará su reconstrucción en el dominio digital. El algoritmo de reconstrucción (“Baseline Restoration” (BLR)) se explicará detalladamente más adelante. Para simular su funcionamiento y obtener los coeficientes necesarios para la reconstrucción final, se desarrollará una aplicación software utilizando el lenguaje de programación Python.

2.3 Objetivos

La presente tesis doctoral forma parte del proyecto NEXT, y se centra en el desarrollo del plano de energía, para el cual se han diseñado e implementado todos los sistemas electrónicos necesarios. Para poder comprender el trabajo presentado en esta tesis, es necesario abordar las diferentes especificaciones de partida.

Seguridad y mejora del montaje. La seguridad, en particular el acoplamiento AC, debe ser considerada como condicionante y su efecto influirá en el funcionamiento de la electrónica. Es de vital importancia tener en

cuenta que dependiendo del tipo de acoplamiento utilizado, la carcasa del PMT puede estar conectada a tierra o a alta tensión, lo que podría influir significativamente tanto en el campo eléctrico como en la seguridad. Es importante destacar que en el caso de que la carcasa del PMT esté conectada a alta tensión, todo el plano también estaría bajo esa tensión, lo que puede representar un riesgo para la seguridad.

Resolución Energética (ruido de la electrónica y el PMT). La resolución energética requerida por el proyecto NEXT para poder distinguir los eventos $\beta\beta$ sin neutrinos es inferior al 1 %. Por lo tanto, es lógico tomar este valor de resolución como referencia para el diseño de la electrónica, tanto del front-end como del DAQ. En el caso del front-end, el límite a la resolución está habitualmente impuesto por el efecto del ruido electrónico. En el caso del DAQ, el límite estará marcado por el número de bits efectivos del sistema. En el sistema propuesto para NEXT, el DAQ tiene una resolución efectiva de 12 bits. Si el front-end se diseña para intentar mantener el ruido por debajo de 1 LSB equivalente del DAQ, el resultado del conjunto permitiría mantener una resolución efectiva de 11.5 bits (ver las ecuaciones siguientes). Dicha resolución sería unas 30 veces inferior al objetivo inicial del 1 %, por lo que se podrían cumplir ampliamente las especificaciones.

$$\delta = \frac{V_{maxADC}}{2^{Nbits}} \quad (2.1)$$

$$Potencia \text{ ruido } FEE = Potencia \text{ ruido } eq. \text{ DAQ} = \frac{(\delta)^2}{12} \quad (2.2)$$

$$RUIDO \text{ TOTAL} = Ruido \text{ eq. DAQ} + RuidoFE = 2 \cdot \frac{(\delta)^2}{12} \quad (2.3)$$

Sistema equivalente con el mismo ruido:

$$\frac{(\delta_n)^2}{12} = 2 \cdot \frac{(\delta)^2}{12} \rightarrow \delta_n = \sqrt{2 \cdot \delta} \quad (2.4)$$

$$\delta = \frac{1}{2^{12}} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{2^{n_{bits}}} = \delta_n \rightarrow n_{bits} = 11,5 \text{ bits efectivos} \quad (2.6)$$

Linealidad (Electrónica, DAQ y PMT). En relación a la linealidad, se identificó la base de polarización del PMT como el elemento más crítico y se estableció como objetivo mantenerla por debajo de 1 LSB equivalente del sistema. Dada la naturaleza de la distorsión que produce, su efecto no puede ser modelado de manera equivalente al ruido, y en ocasiones puede ser mitigado mediante técnicas de calibración. En consecuencia, se espera que su efecto, en el peor de los casos, sea comparable al del ruido, aunque probablemente sea menor.

Radiopureza. En lo que respecta a la radiopureza, su abordaje es complejo y requiere que los componentes utilizados sean lo menos radioactivos posible. En consecuencia, su efecto será monitoreado y evaluado durante todo el proceso de diseño e implementación.

"Hasta el infinito y más allá ..."

– Buzz Lightyear

3

Soluciones adoptadas y desarrollo

3.1 Impacto de la radiopureza en el desarrollo del proyecto

La radiopureza es uno de los aspectos críticos del experimento, lo que implica que los componentes más sensibles, es decir aquellos que se encuentran dentro del volumen activo, deban ser seleccionados cuidadosamente. Esto incluye a los PMTs y a sus bases de polarización. Para abordar este problema, se ha realizado una extensa campaña de mediciones de radioactividad de todos de los componentes para alcanzar los requisitos del experimento. En particular debido a su exposición al volumen activo, los PMTs seleccionados (Hamamatsu R11410) se consideran unos de los más radiopuros del mercado. En el caso de sus

bases de polarización, también se han seleccionado componentes de muy baja radioactividad que serán descritos con mayor detalle en un capítulo posterior.

3.2 PMT como fotosensores

3.2.1 Fundamentos de los PMT

Tal y como se ha expuesto en secciones previas, la utilización de PMTs es imprescindible para llevar a cabo la medición de energía en el marco del proyecto NEXT. En consecuencia, desde sus inicios, se hizo necesario desarrollar la correspondiente electrónica para su uso. Las siguientes secciones cumplen la función de introducir los detectores ópticos de vacío y de proporcionar una descripción del principio de funcionamiento de los PMTs.

3.2.2 Detectores ópticos

Los fotodetectores o sensores de luz se pueden dividir según su principio de funcionamiento en tres categorías principales: efecto fotoeléctrico externo, efecto fotoeléctrico interno y tipos térmicos.

El efecto fotoeléctrico externo es un fenómeno en el que cuando la luz incide en un metal o semiconductor colocado en el vacío, los electrones se emiten desde su superficie hacia el vacío. Los PMTs utilizan este efecto fotoeléctrico externo. Son ampliamente utilizados en equipos médicos, instrumentos analíticos y sistemas de medición industrial. Este tipo es el utilizado en el experimento NEXT para medir energía, por lo tanto serán explicados con más detalles lo largo de la tesis.

3.2.3 Fotomultiplicadores

Un PMT es un tubo de vacío que consiste en una ventana de entrada, un fotocátodo, electrodos de enfoque, un multiplicador de electrones y un ánodo generalmente sellado en un tubo de vidrio. La figura 3.1 muestra la construcción esquemática de un PMT.

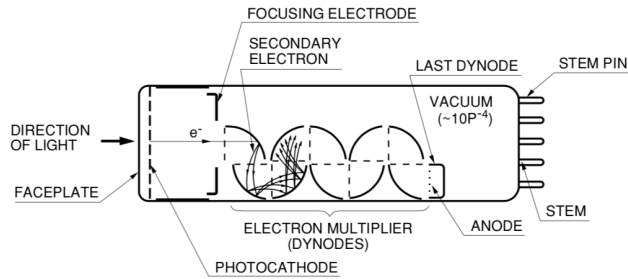


Figura 3.1: Esquema general del funcionamiento de un PMT [[Hamamatsu book 4 edition. s.f.](#)]

La luz que entra a un PMT se detecta y produce una señal de salida a través de los siguientes procesos:

1. La luz pasa a través de la ventana de entrada.
2. La luz excita los electrones en el fotocátodo de modo que esos fotoelectrones se emiten al vacío (efecto fotoeléctrico externo).
3. Los foto-electrones son acelerados y enfocados por el electrodo de enfoque en el primer dínodo, donde se multiplican por medio de la emisión de electrones secundarios. Esta emisión secundaria se repite en cada uno de los sucesivos dínodos.
4. Los electrones secundarios multiplicados emitidos desde el último dínodo son finalmente recogidos por el ánodo.

Emisión del foto-electrón

La conversión fotoeléctrica se clasifica en efectos fotoeléctricos externos por los cuales los foto-electrones se emiten al vacío desde un material y los efectos fotoeléctricos internos por los cuales los foto-electrones se activan en la banda de conducción de un material. El fotocátodo tiene el primer efecto y el último está representado por el efecto fotoconductor o fotovoltaico.

Cuando los fotones chocan contra un fotocátodo, los electrones en la banda de valencia absorben la energía del fotón ($h\nu$) y se excitan, difundiéndose hacia la

superficie del fotocátodo. Si los electrones difusos tienen suficiente energía para superar la barrera del nivel de vacío, se emiten en el vacío como fotoelectrones. Esto se puede expresar en un proceso de probabilidad, y la eficiencia cuántica $\eta(h\nu)$, es decir, la proporción de electrones de salida a fotones incidentes viene dada por:

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P\nu}{k} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{kL}} \cdot P_s$$

donde

R: Coeficiente de reflexión.

k: Coeficiente de absorción total de fotones.

Pv: Probabilidad de que la absorción de luz pueda excitar los electrones a un nivel superior al nivel de vacío.

L: Media de la longitud de escape de electrones excitados.

Ps: Probabilidad de que los electrones que llegan a la superficie del fotocátodo se liberen al vacío.

ν : Frecuencia de la luz.

En la ecuación anterior, si hemos elegido un material apropiado según determina los parámetros R, k y Pv, los factores que dominan la eficiencia cuántica serán L (Media de la longitud de escape de los electrones excitados) y Ps (probabilidad de que se emitan electrones en el vacío). L se hace más largo por el uso de un mejor cristal y Ps depende en gran medida de la afinidad de electrones (EA).

Los fotocátodos se pueden clasificar por el proceso de emisión del fotoelectrón en un modo de reflexión y un modo de transmisión. El modo fotográfico de reflexión se forma generalmente en una placa de metal y los fotoelectrones se emiten en la dirección opuesta a la luz incidente. El modo de transmisión del fotocátodo generalmente se deposita como una película delgada sobre una placa de vidrio que es ópticamente transparente. Los fotoelectrones se emiten en la misma dirección que la luz incidente. El fotocátodo de modo de reflexión se

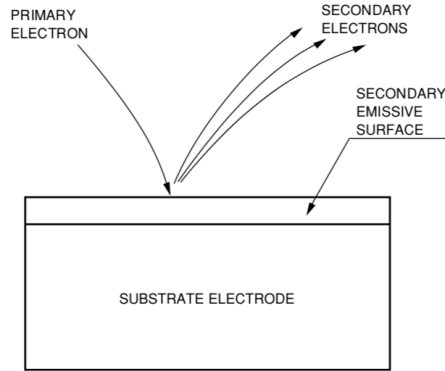


Figura 3.2: Emisión secundaria del dínodo.

usa principalmente para los PMTs de lado que reciben luz a través del lado de vidrio, mientras que el fotocatodo de modo de transmisión se usa en PMTs que detectan la luz de entrada a través del extremo de una bombilla cilíndrica.

Dínodos (Multiplicador de electrones)

Como se indicó anteriormente, los fotoelectrones emitidos desde el fotocatodo se multiplican por el primer hasta el último dínodo, con una amplificación de la corriente, y finalmente se envían al ánodo.

Los principales materiales emisores secundarios utilizados para los dínodos son: antimonida alcalina, óxido de berilio (BeO), óxido de magnesio (MgO), fosfuro de galio (GaP) y fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP). Estos materiales se recubren sobre un electrodo de sustrato hecho de níquel, acero inoxidable o aleación de cobre-berilio. La figura 3.2 muestra un modelo de la multiplicación de emisión secundaria de un dínodo.

Cuando un electrón primario con energía inicial E_p golpea la superficie de un dínodo, se emiten δ electrones secundarios. Este δ , el número de electrones secundarios por electrón primario, se denomina relación de emisión secundaria. La figura 3.3 muestra la relación de emisión secundaria δ para varios materiales de dínodos en función de la tensión de aceleración para los electrones primarios.

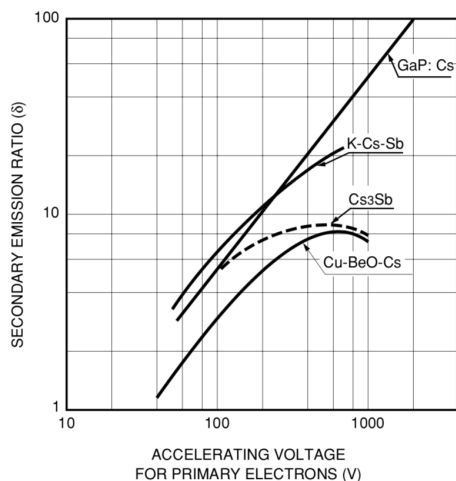


Figura 3.3: Relación de emisión secundaria.[Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

Idealmente, la ganancia de un PMT que tenga el número de etapas de dínodo n y la relación de emisión secundaria promedio δ por etapa será de δ^n . Debido a que hay una variedad de estructuras de dínodos disponibles y su ganancia, respuesta de tiempo y linealidad difieren según el número de etapas de dínodos y otros factores, el tipo de dínodo óptimo debe seleccionarse de acuerdo con su aplicación.

Ánodo

El ánodo de un PMT es un electrodo que recoge electrones secundarios multiplicados en el proceso en cascada a través de dínodos de múltiples etapas, y envía la corriente de electrones a un circuito externo. Los ánodos están diseñados cuidadosamente para tener una estructura optimizada para las trayectorias de electrones discutidas anteriormente. Generalmente, un ánodo se fabrica en forma de varilla, placa o electrodo de malla. Uno de los factores más importantes en el diseño de un ánodo es que se puede establecer una diferencia de potencial adecuada entre el último dínodo y el ánodo para evitar efectos de carga espacial y obtener una gran corriente de salida.

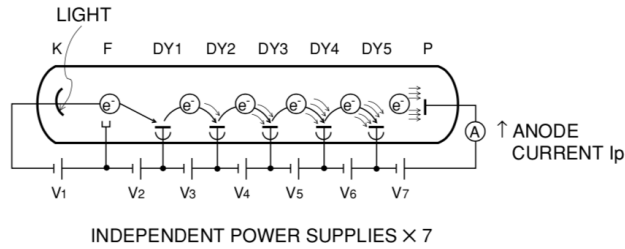


Figura 3.4: Diagrama esquemático de la operación del PMT [Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

3.2.4 Utilizando PMTs

Circuito divisor de tensión

Para que el PMT funcione correctamente, se aplica alta tensión entre 500 y 3000 voltios, dependiendo del PMT, a través del cátodo (K) y el ánodo (P), con un gradiente de tensión adecuado. Este gradiente de tensión se puede crear utilizando diferentes configuraciones, una de ellas sería utilizando múltiples fuentes de alimentación independientes, como se muestra en la figura 3.4, pero este método no es práctico.

En la práctica, como se muestra en la figura 3.5a, la tensión entre etapas para cada electrodo se crea mediante un divisor resistivo, este va conectado entre el ánodo y el cátodo. También se pueden usar diodos zener junto con resistencias para estabilizar de forma más precisa la tensión, como se muestra en la figura 3.5b. Estos circuitos son conocidos como circuitos divisores de voltaje.

La corriente I_b que fluye a través de los circuitos divisores de tensión que se muestran en la figura 3.5 se denomina corriente divisoria y está estrechamente relacionada con la linealidad de salida. La corriente divisoria I_b

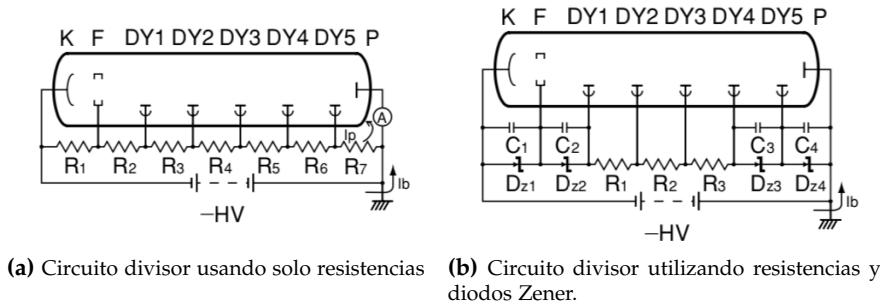


Figura 3.5: Circuitos divisor de voltaje [Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

es aproximadamente la tensión aplicada V dividida por la suma de los valores de resistencia de la siguiente manera:

$$I_b = \frac{V}{R_1 + R_2 + \dots + R_6 + R_7} \quad (3.1)$$

Los diodos Zener (D_z) que se muestran en la figura 3.5b se utilizan para que la tensión entre etapas se mantenga a valores constantes para estabilizar el funcionamiento del PMT, independientemente de la magnitud de la tensión de alimentación del cátodo al ánodo. En este caso, I_b se obtiene utilizando la ecuación siguiente.

$$I_b = \frac{V - (\text{Suma de tensiones generadas de } D_{z1} \text{ a } D_{z4})}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.2)$$

Los condensadores C_1, C_2, C_3 y C_4 conectados en paralelo con los diodos Zener sirven para minimizar el ruido generado por los diodos Zener. Cuando la corriente que fluye a través de los diodos Zener es insuficiente este ruido se vuelve significativo. Por lo tanto, se debe tener cuidado ya que este ruido puede afectar la relación señal a ruido de la salida del PMT.

Puesta a tierra del ánodo y del cátodo

Como se muestra en la figura 3.5, la técnica general utilizada para los circuitos divisores de tensión es conectar a tierra el ánodo, y aplicar un voltaje negativo al cátodo. Esta configuración elimina la diferencia de potencial entre el circuito externo y el ánodo. Sin embargo, esta configuración de conexión a tierra del ánodo, puede provocar un aumento significativo del ruido en el caso de que se coloque un soporte metálico, una caja o un estuche de protección magnética conectado a tierra cerca del PMT, ya que puede hacer que los electrones en el PMT golpeen la pared interior y se puede producir un centelleo del vidrio.

En la configuración habitual de un pmt el cátodo se conecta a tierra mientras que al ánodo se aplica alta tensión positiva, como se muestra en la figura 3.6. Con este esquema de cátodo a tierra, se debe usar un condensador de acoplo (C_c) para eliminar la alta tensión positiva (+ HV) aplicada al ánodo de la señal. En el recuento del centelleo real usando este circuito divisor de tensión, puede ocurrir un problema relacionado con el desplazamiento de la línea base si la eficiencia del conteo aumenta demasiado, o se puede generar ruido si hay una corriente de fuga en el condensador de acoplo. Por lo tanto, se debe tener cuidado con respecto a estos puntos.

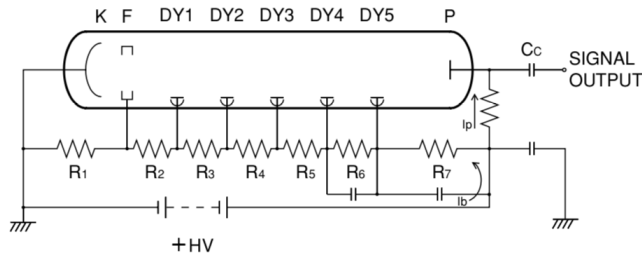


Figura 3.6: Circuito divisor de tensión con cátodo a tierra. [Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

Divisor de tensión y linealidad de la corriente de salida.

En los esquemas de conexión a tierra, tanto en el ánodo como en el cátodo, y en el modo de operación de DC y de pulso, cuando el nivel de luz incidente en el fotocátodo aumenta, también lo hace la corriente de salida. Como se muestra en la figura 3.7, la relación entre el nivel de luz incidente y la corriente del ánodo comienza a desviarse de la linealidad ideal en un cierto nivel de corriente (región B) y, finalmente, la salida del PMT entra en saturación (región C).

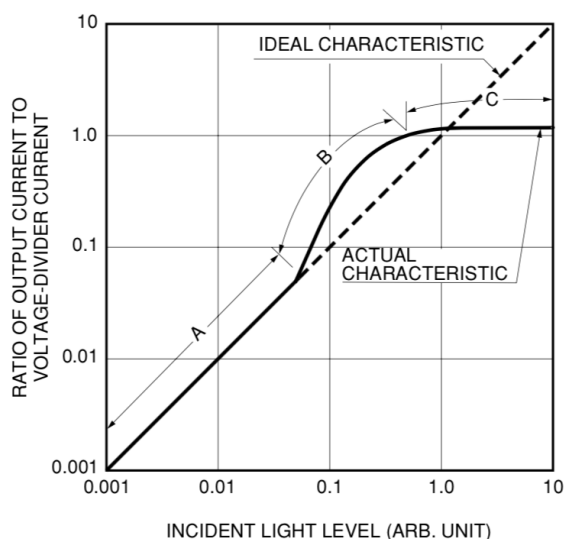


Figura 3.7: Linealidad de salida de un PMT. [Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

Al derivar una salida DC de un PMT utilizando el circuito operativo básico que se muestra en la figura 3.8, la corriente que realmente fluye a través de una resistencia divisora de tensión, por ejemplo la corriente que fluye a través de la resistencia R7, es igual a la diferencia entre la corriente divisora I_b y la corriente de ánodo I_p que fluye en la dirección opuesta a través del circuito de P-Dy5-R7-P. Del mismo modo, para otras resistencias divisoras de tensión, la corriente real es la diferencia entre la corriente divisora I_b y la corriente de dínodo ID_y que fluye en la dirección opuesta a través de la resistencia divisora de tensión.

La corriente del ánodo y el flujo de la corriente del dínodo actúan para reducir la corriente del divisor, y la pérdida de tensión entre dínodos que la acompaña se vuelve más significativa en las últimas etapas que trabajan con corrientes de dínodo más grandes.

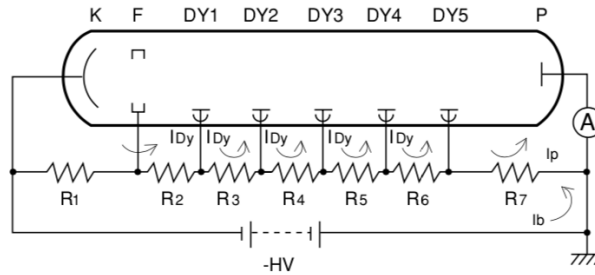


Figura 3.8: Circuito de funcionamiento básico para un PMT. [Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

La reducción de la corriente del divisor puede ignorarse si la corriente de salida del ánodo es pequeña. Sin embargo, cuando aumenta el nivel de luz incidente y aumenta la corriente resultante de ánodo y dínodo, la distribución de tensión para cada dínodo varía considerablemente como se muestra en la figura 3.9. Debido a que la alta tensión entre cátodo y ánodo se mantiene constante por la fuente de alimentación de alta tensión, la pérdida de la tensión entre las últimas etapas se redistribuye a las etapas previas, de modo que habrá un aumento en la tensión entre ellas.

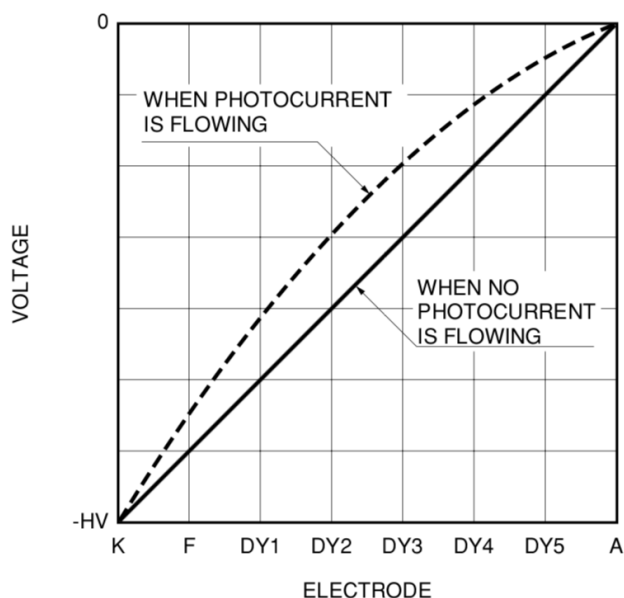


Figura 3.9: Influencia de la fotocorriente en la tensión aplicada a cada electrodo. [Hamamatsu book 4 edition. s.f.]

La pérdida de la tensión entre etapas por medio de la corriente de electrones multiplicada aparece más significativamente entre el último dinodo (Dy5 en la figura 3.8) y el ánodo, pero la tensión aplicada a esta área no contribuye a la relación de emisión secundaria del último dínodo. Por lo tanto, el cambio en la distribución de tensión en las etapas anteriores produce un aumento colectivo en la amplificación de la corriente, como se muestra en la región B en la figura 3.7. Si el nivel de luz incidente se incrementa aún más, de modo que la corriente del ánodo se vuelve bastante grande, la eficiencia de la colección de electrones secundarios del ánodo se degrada a medida que disminuye la tensión entre el último dinodo y el ánodo. Esto conduce al fenómeno de saturación como el que se muestra en la región C en la figura 3.7.

Si bien existen diferencias según el tipo de PMT y el circuito divisor que se esté utilizando, la máxima corriente de ánodo en una salida de DC suele ser de 1/20 a 1/50 de la corriente divisora. Si se requiere una linealidad mejor que ± 1 por

ciento, la salida máxima debe mantenerse a menos de 1/100 de la corriente del divisor.

Para aumentar la máxima salida lineal, hay dos técnicas: una es usar un diodo zener entre el último dínodo y el ánodo como se muestra en la figura 3.5b y, si es necesario, entre la siguiente hasta la última o desde la segunda hasta la última etapa también, y la otra es disminuir los valores de la resistencia del divisor de tensión para aumentar la corriente del divisor. Sin embargo, con la técnica anterior, si la corriente del divisor es insuficiente, se generará ruido desde el diodo Zener, lo que posiblemente se traduzca en efectos perjudiciales a la salida. Debido a esto, es esencial aumentar la corriente del divisor a un nivel adecuado y conectar un condensador que tenga una buena respuesta de frecuencia en paralelo con el diodo zener para absorber el posible ruido. También es necesario reducir al máximo el ancho de banda del circuito posterior, en la medida en que la velocidad de respuesta lo permita.

Modo operación pulso y sus medidas.

Cuando un PMT funciona en modo pulsos utilizando el circuito divisor de tensión que se muestra en la figura 3.5a o en la figura 3.6, la máxima linealidad de salida se limita a una fracción de la corriente divisora, como en el caso de la operación de DC. Para evitar este problema, los condensadores de desacoplo se pueden conectar a las últimas etapas, como se muestra en las figuras 3.10 y 3.11. Estos condensadores suministran al PMT una carga eléctrica durante la formación del pulso de señal y restringen la caída de tensión entre el último dínodo y el ánodo, lo que produce una mejora significativa en la linealidad del pulso. Si el ancho de pulso es lo suficientemente corto como para que el ciclo de trabajo sea pequeño, este método hace posible derivar una corriente de salida sin llegar a alcanzar el nivel de saturación. Consecuentemente, un pico alto de corriente de salida, varias miles de veces más grande que la corriente divisoria puede ser alcanzada.

Existen dos métodos para usar los condensadores de desacoplo: un método de conexión en serie y un método de conexión en paralelo, como se ilustra a continuación en las figuras 3.10 y 3.11. La conexión en serie se usa más

comúnmente porque la conexión en paralelo requiere condensadores que puedan soportar una alta tensión.

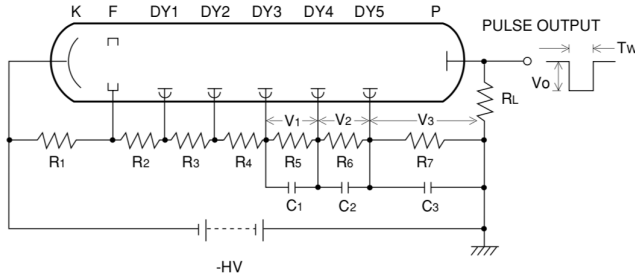


Figura 3.10: Circuito divisor con condensadores de desacoplo conectados en serie.

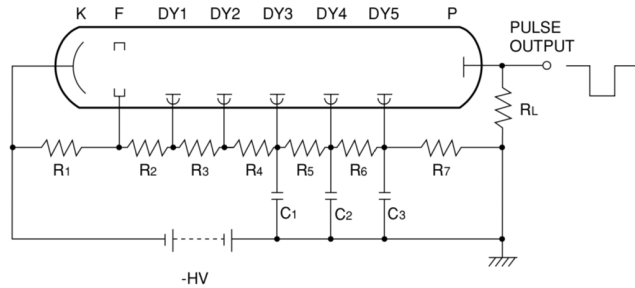


Figura 3.11: Circuito divisor de tensión con condensadores de desacoplo conectados en paralelo.

A continuación se explica el procedimiento para calcular los valores de los condensadores, utilizando el circuito que se muestra en la figura 3.10 como ejemplo.

En primer lugar, sabiendo que la tensión pico del pulso de salida es V_0 , el ancho de pulso Tw y la resistencia de carga R_L , la carga del pulso de salida Q_0 por pulso se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_0 = Tw \frac{V_0}{R_L} \quad (3.3)$$

A continuación, encontremos los valores de capacitancia de los condensadores de desacoplo C_1 a C_3 , utilizando Q_0 . Si asumimos que la carga almacenada en el condensador C_3 es Q_3 , para lograr una buena linealidad de salida mejor que ± 3 por ciento, generalmente se debe establecer la siguiente relación:

$$Q_3 \geq 100Q_0 \quad (3.4)$$

Siguiendo la relación de la capacidad con la carga del condensador ($Q = C \cdot V$), el valor de C_3 vendría dado por la siguiente ecuación.

$$C_3 \geq 100 \frac{Q_0}{V_3} \quad (3.5)$$

Normalmente, la relación de emisión secundaria δ por etapa de un PMT es de 3 a 5, con una tensión entre etapas de 100 voltios. Sin embargo, considerando las ocasiones en que la tensión entre etapas se reduce a aproximadamente 70 u 80 voltios, las cargas Q_2 y Q_1 almacenadas en C_2 y C_1 respectivamente se calculan suponiendo que δ entre cada dinodo tendrá un valor cercano a 2, como sigue:

$$Q_2 = 100 \frac{Q_3}{2} \quad Q_1 = \frac{Q_2}{2} = \frac{Q_3}{4} \quad (3.6)$$

Entonces, los valores de capacitancia de C_2 y C_1 se pueden obtener de la misma manera que en C_3 .

$$C_2 \geq 50 \frac{Q_0}{V_2} \quad (3.7)$$

$$C_1 \geq 25 \frac{Q_0}{V_1} \quad (3.8)$$

En los casos en los que los condensadores de desacoplo deban colocarse en las etapas del dínodo antes que Dy3 para obtener una salida de corriente aún mayor, también se puede utilizar el mismo cálculo.

Aquí, como ejemplo, con el voltaje de pico de salida $V_0=100\text{mV}$, el ancho de pulso $T_W = 1\mu\text{s}$, la resistencia de carga $R_L = 50\Omega$, y las tensiones entre etapas $V_3 = V_2 = V_1 = 100\text{V}$, el valor de cada condensador se puede calcular siguiendo estos pasos:

Primero, la cantidad de carga por pulso de salida se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_0 \geq \frac{100\text{mV}}{50\Omega} \times 1\mu\text{s} = 2\text{nC} \quad (3.9)$$

Los valores de capacitancia requeridos para los condensadores de desacoplo C_3, C_2 y C_1 se calculan respectivamente:

$$C_3 \geq 100 \frac{2\text{nC}}{100\text{V}} = 2\text{nF} \quad (3.10)$$

$$C_2 \geq 50 \frac{2\text{nC}}{100\text{V}} = 1\text{nF} \quad (3.11)$$

$$C_1 \geq 25 \frac{2\text{nC}}{100\text{V}} = 0,5\text{nF} \quad (3.12)$$

Los valores de capacitancia anteriores son valores mínimos para que funcione adecuadamente. Por lo tanto, se sugiere que el valor de los condensadores sea aproximadamente 10 veces más grande que los valores calculados. Si la corriente de salida aumenta aún más, deben conectarse condensadores de desacoplo adicionales en las etapas anteriores, así como aumentar los valores de capacitancia de C_1 a C_3 . Al igual que con la operación DC, debe observarse que en la operación en modo pulsos, incluso con las medidas proporcionadas anteriormente, la salida se desvía del rango de linealidad cuando la corriente de salida promedio excede de 1/20 a 1/50 de la corriente del divisor. Se requiere especial cuidado cuando se opera a altas tasas de conteo, incluso si la corriente pico de salida es baja.

3.2.5 Características más importantes relacionadas con el proyecto

El proceso de selección de los PMT se llevó a cabo como un balance entre las características de radiopureza, fundamentales para el proyecto, y el mayor grado posible de cobertura fotosensible. Dado que el aporte de radioactividad predominante en el volumen activo serán los PMTs seleccionados (Hamamatsu R11410-10), estos se midieron de forma precisa en los detectores de germanio del laboratorio subterráneo de Canfranc. Los resultados obtenidos se muestran en el artículo [Cebrián y col. 2017]. Por último pero no menos importante los PMTs seleccionados tienen una eficiencia cuántica suficiente a la longitud de onda de emisión del xenón (175 nm) (ver 3.12).

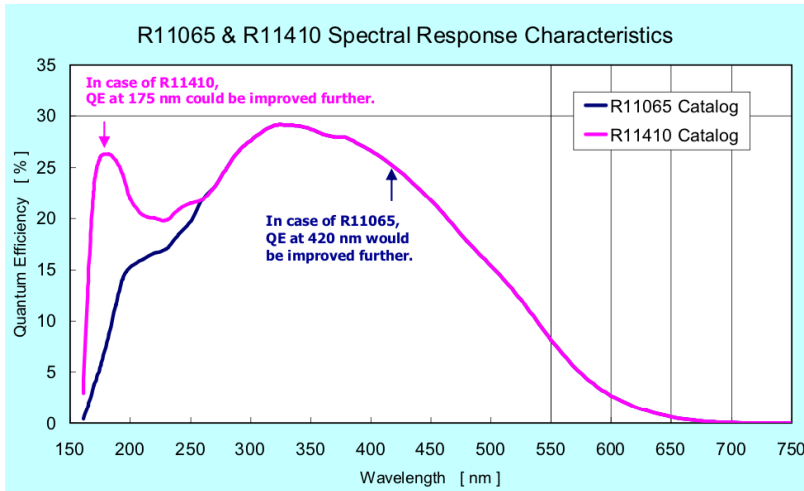


Figura 3.12: Spectral response. [Hamamatsu]

3.2.6 Diseño de bases

Para realizar el diseño de la base también hay que mantener un compromiso entre linealidad y radiopureza, ya que un mayor número de componentes podría incrementar la linealidad pero pondría en riesgo el nivel de radioactividad de estas bases. Como punto de partida se siguieron las indicaciones proporcionadas por el fabricante y posteriormente se introdujeron modificaciones y mejoras en

el diseño hasta obtener la versión definitiva. El proceso completo de diseño de las bases para NEXT se muestra en la sección 3.6.

3.3 Conexión a tierra del cátodo del PMT y sus consecuencias.

Para simplificar la construcción e integración del plano de energía en la estructura de la vasija, en NEW, los fotocatodos de los PMTs (y por lo tanto, sus carcassas) están conectados a tierra, mientras que el ánodo se establece a la tensión de funcionamiento de PMT (1,23 kV). Este hecho implica que se debe utilizar un esquema de conexión de cátodo a tierra por razones de seguridad eléctrica.

Además, con una conexión de cátodo a tierra reducimos los efectos de ruido de baja frecuencia y mejoramos la seguridad del detector. Esto implica una lectura acoplada en AC, y por lo tanto se producirían, al eliminar la componente DC, variaciones de la línea de base en las señales de los PMTs que dependerán de su longitud y amplitud.

La salida del ánodo debe estar acoplada en AC a través de un condensador, como se muestra en figura 3.13, ya que la tensión DC de la salida del ánodo es igual a la tensión de alimentación del PMT. La información relevante sobre los condensadores de acoplo está más detallada en la sección 3.4.2. En los próximos capítulos se presenta una descripción detallada de la electrónica y un enfoque novedoso basado en una restauración de la línea de base digital para obtener una respuesta lineal y cancelar los efectos de acoplamiento en AC.

Aunque se utilizará una línea de transmisión diferencial en la implementación final, se utilizarán los equivalentes de un solo terminal de lectura en las siguientes explicaciones por razones de simplicidad. Como consecuencia, Z_{in} está relacionado con la impedancia equivalente de entrada de un solo extremo del amplificador, que se traducirá a una diferencial en el diseño final.

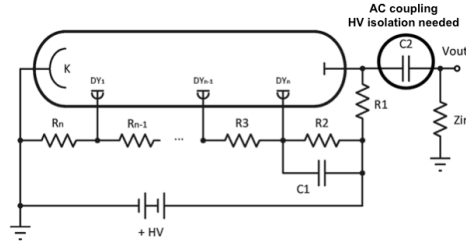


Figura 3.13: Esquema de conexión del PMT con fotocátodo a tierra donde se muestra el acoplo AC.

Un esquema de acoplamiento AC crea, en primer orden, un filtro paso alto. La figura 3.14 muestra el circuito eléctrico equivalente del esquema de conexión, modelando el PMT como una fuente de corriente simple.

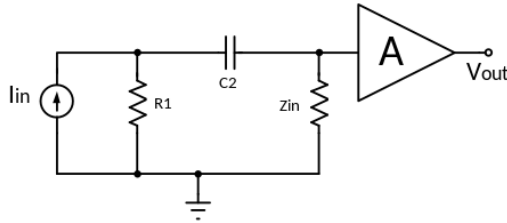


Figura 3.14: Circuito equivalente con el cátodo conectado a tierra.

La función de transferencia de Laplace del filtro (figura 3.14) se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{v_O}{i_I} = A \frac{R_1 Z_{in} C_2 s}{1 + (R_1 + Z_{in}) C_2 s} \quad (3.13)$$

$$\frac{v_O}{i_I} = A \frac{Z_{in} R_1}{Z_{in} + R_1} \frac{(R_1 + Z_{in}) C_2 s}{1 + (R_1 + Z_{in}) C_2 s} \quad (3.14)$$

donde R_1 representa la impedancia de la base del PMTs, siendo la resistencia de alto valor que define principalmente el filtro junto con el condensador de acoplo C_2 . La terminación de la línea diferencial de 120Ω de impedancia característica que se empleará posteriormente será implementada con una terminación adaptada en modo común y diferencial de tipo pi. En este caso en especial, el modo común puede ser importante ya que el modo de conexión del PMT no es totalmente diferencial, esto se explica posteriormente en la sección 3.4.1. Para los desarrollos de esta sección Z_{in} asumirá el rol de esta terminación adaptada.

El filtro obtenido como respuesta de la conexión acoplada en AC bloquea la componente DC y atenúa los componentes de frecuencia por debajo de la frecuencia de corte f_{cutoff} , definida como:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi(R_1 + Z_{in})C_2} \quad (3.15)$$

El pulso de salida después del filtro tiene un comportamiento similar a la derivada del pulso de entrada y se caracteriza por un área total nula. Como la energía de una señal genérica es proporcional a su área, se deduce que para poder calcular correctamente la energía de la señal obtenida a la salida del filtro será necesario aplicar un algoritmo de deconvolución (o restauración de la línea de base) al pulso de salida, que permita recuperar su área original y así obtener la medida de su energía. En la sección 3.5 se explicará este procedimiento con más detalle. El error introducido por el algoritmo de deconvolución debe ser despreciable para poder obtener una resolución de energía intrínseca al nivel demandado por el experimento.

De hecho, el modelo simple de los PMT como fuente de corriente ideal es insuficiente dada la precisión requerida y debe ser refinado de varias maneras. Por ejemplo, el efecto del intercambio de carga entre los condensadores de la base del PMT y el condensador de acoplo, debe incluirse en el modelo (figura 3.15). La R_{PMT} de la figura 3.15a (R_2 en la figura 3.13) se considera mucho mayor que la impedancia equivalente del condensador en el rango de frecuencias de estudio. Se asume que la tensión en el último dínodo es muy estable (de carácter

DC) y que la fuente de alta tensión no aporta carga a la formación de la señal. Por lo tanto podremos prescindir de R_{PMT} en el modelo final (figura 3.15b)

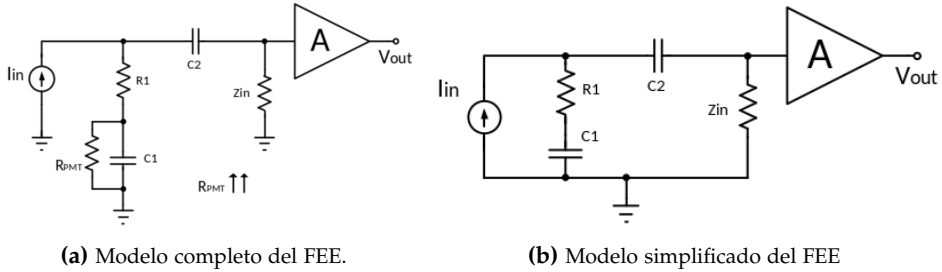


Figura 3.15: Modelo más sofisticado del FEE + base del PMT

Utilizando el circuito equivalente de la figura 3.15a, que puede simplificarse aún más en la figura 3.15b, se obtienen las ecuaciones del filtro resultante, algo más complicado que en el caso original de un filtro paso alto simple, pero que describe el comportamiento del conjunto con mayor precisión. El filtro sigue esta ecuación:

$$\frac{v_O}{i_I} = A \cdot \frac{Z_{in}}{\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)} \cdot \frac{1 + R_1 C_1 s}{1 + \frac{(R_1 + Z_{in}) C_1}{(1 + \frac{C_1}{C_2})} s} \quad (3.16)$$

3.4 Diseño de la electrónica de acondicionamiento

Una de las características más distintivas de una HPXe-EL es su excelente resolución de energía, con un límite intrínseco (dado por el Fano factor¹) de aproximadamente 0.3 % FWHM en zona de interés del espectro de xenón $Q_{\beta\beta}$ (2.458 MeV). Los prototipos de NEXT [Álvarez y col. 2012a] , así como los resultados iniciales de NEXT-White [Renner y col. 2018] también han

¹Fano factor se define como una medida de la dispersión de una distribución de probabilidad de un ruido de Fano (una fluctuación de una carga eléctrica obtenida en un detector a pesar del valor constante de la cantidad de energía medida, que surge de los procesos en el detector). El factor Fano puede verse como una relación señal-ruido; es una medida de la confiabilidad con la que se podría estimar la variable aleatoria a partir de una ventana de tiempo que en promedio contiene varios eventos aleatorios.

demostrado una resolución de energía para partículas puntuales (rayos X de Krypton) que se extrapola a 0.5% en $Q_{\beta\beta}$ (asumiendo una escala ingenua $\sigma_{Q_{\beta\beta}} \sim \sigma_{Kr} / \sqrt{E}$) y mejor que $\sim 0,7\%$ FWHM para trazas extendidas.

La electrónica de acondicionamiento para el plano de energía de NEXT-White ha sido completamente desarrollada desde cero, y fue diseñada para preservar la resolución intrínseca que caracteriza a una HPXe-EL. Se ha elegido un esquema de cátodo conectado a tierra para simplificar el diseño estructural y eliminar la necesidad de un aislamiento de la carcasa, tal y como se explicó en secciones anteriores. Además, se ha logrado una notable reducción de los efectos de ruido de baja frecuencia utilizando esta estrategia de conexión.

Ante la posibilidad de emplear un amplificador diferencial basado en COTS (componentes electrónicos comerciales listos para usar), se ha preferido optar por un diseño propio debido fundamentalmente a tres consideraciones:

1. Optimizar la conexión con el sistema de adquisición posterior y los requerimientos de la señal de entrada, ya que la señal debe ser diferencial con un offset de 500mV.
2. Posibilidad de ajustar con precisión parámetros de funcionamiento como la ganancia o el tiempo de shaping.
3. En caso de requerir una mejora en las características de ruido o linealidad, la posibilidad de mejorar la topología o la selección de los componentes empleados.

3.4.1 Requerimientos de diseño

El diseño final se muestra en un esquema simplificado en la figura 3.16. Se ha diseñado una transmisión pseudo-diferencial para reducir el ruido acoplado, que se espera que sea alto, ya que la distancia entre el armario de la electrónica donde se sitúa el FEE y la vasija de presión NEXT-White es de aproximadamente 12 metros. El cable elegido fue Twinax TWC-124-2, dicho cable consta de un par de líneas trenzadas con 124Ω de impedancia de par, ambas líneas apantalladas en su conjunto y que puede trabajar a tensión de operación 2 kV de tensión

continua. La colocación del condensador de acoplo C2 permite el uso del mismo cable tanto para la tensión de alimentación como para la extracción de la señal. Para lograr una adaptación de impedancias con la línea de transmisión se ha empleado una terminación de tipo π donde se aprovecha implícitamente la impedancia de entrada del amplificador definida por RA y RB. Tanto la impedancia diferencial de (120Ω) como la impedancia de modo común de (50Ω) se han definido en función de las características mencionadas de la línea de transmisión. La terminación del modo común es de gran importancia ya que se está utilizando una conexión pseudo-diferencial en la base PMT y se espera que el ruido de las señales del modo común que viajan a lo largo de la línea de transmisión sean bastante altas.

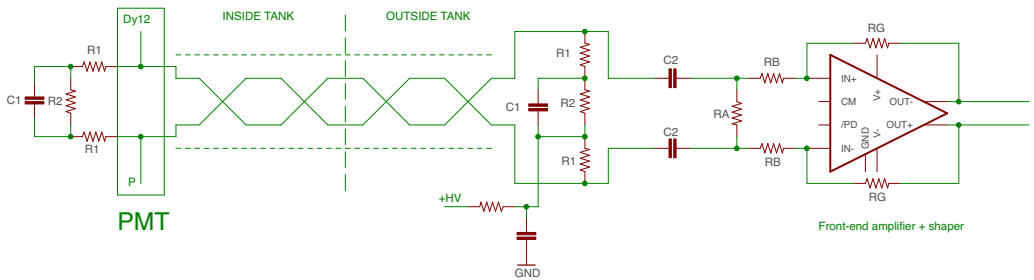


Figura 3.16: Esquema simplificado del FEE.

3.4.2 Solución de alto valor de constante de tiempo (τ).

Dado que la constante de tiempo τ del circuito equivalente que se muestra en la fig. 3.16 se encuentra en el denominador de f_{cutoff} (ecuación. 3.18), una mayor τ atenuará un rango más corto de frecuencias produciendo una señal que se asemejará más a la original. Sin embargo, hay un problema con la implementación de esta solución. Los condensadores de acoplo AC de buena calidad que pueden soportar altos voltajes suelen tener valores nominales bajos. Es difícil encontrar condensadores más altos de 10 nF que cumplan con dichas especificaciones. Por lo tanto deberían de utilizarse resistencias de valor alto para conseguir una τ elevada. El siguiente ejemplo muestra cómo calcular el

valor de resistencia necesaria en función de la pérdida de señal en la amplitud que provocaría una degradación en la resolución de energía.

$$\tau = (R_1 + Z_{in}) \cdot C \quad (3.17)$$

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \quad (3.18)$$

Valor de C en función de la variación de la línea base

El cambio de línea base debido al cambio de tensión en el condensador de acoplo AC se puede calcular como la carga y descarga de la tensión a través de sus terminales debido a un cambio de señal en la entrada. La curva de carga / descarga de un condensador está relacionada con su τ en el circuito y sigue la ecuación. 3.19.

$$\Delta V_C = V_C \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.19)$$

Para conseguir una ΔV de un 2% que se traduciría en un error de aproximadamente el 1% en la medida de la energía (asumiendo que la descarga es lineal) y tomando el caso peor de una señal de duración $200\mu s$, el valor de τ debería ser de 0.01 segundos. Tomando un valor de condensador de 10 nF la resistencia necesaria sería de $1M\Omega$. Este tipo de valores de resistencia tan elevados pueden causar problemas de aislamiento combinados con la resistencia parásita del condensador de acoplo AC (figura 3.17). Además sería necesario estudiar su efecto en el ruido del sistema y en el funcionamiento de la etapa amplificadora.

Efecto del factor de disipación del condensador de acoplo de AC

La resistencia parásita paralela (R_{par}) del condensador de acoplo de AC funciona como una vía de derivación para las señales en la gama de baja frecuencia (figura 3.17). La integral de la señal acoplada de AC debería ser cero para un condensador ideal, pero no es así. Hay una pequeña cantidad de desplazamiento positivo al final del pulso (en el caso de ser positivo). El origen de esta desviación está en la parte de la señal de entrada que

no pasa por el condensador de acoplamiento sino a través de la resistencia parásita. El valor final de la integral de la señal corresponderá al total del error que esperamos en el cálculo de la energía final, debido a la no idealidad del condensador.

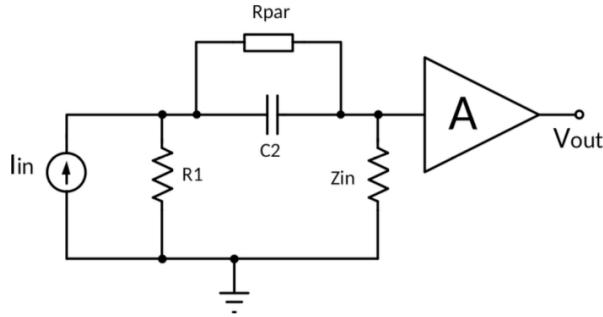


Figura 3.17: Efecto de R_{par} del condensador AC.

El valor de R_{par} basado en los valores de la hoja de datos ($DF=0.15\%$) y asumiendo que las características de los condensadores de dieléctrico C0G utilizados permanecen inalteradas para todo el rango de tensión, puede calcularse con la ecuación 3.23. Finalmente R_{par} tiene un valor de $10\text{ M}\Omega$.

$$DF = \frac{ESR}{Z_c} \quad (3.20)$$

$$DZ_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (3.21)$$

$$Q = \frac{1}{DF} \quad (3.22)$$

$$R_{par} = Q^2(ESR) \quad (3.23)$$

Como resultado de este valor R_{par} , los componentes de baja frecuencia de la señal de entrada (los pulsos de señal pueden ser realmente largos, de hasta 200 μs), así como el ruido de baja frecuencia acoplado a los cables de conexión, se trasladarían a la salida casi sin atenuación². Se han realizado simulaciones con LTSPICE para medir este efecto. Para pulsos de 200 μs de duración, el error en la estimación del área sería de aproximadamente un 0,20 %, que habría que sumar al desplazamiento máximo de la línea de base establecido por el valor del condensador.

Por lo expuesto en los puntos anteriores, el condensador de acoplo C_2 se escogerá de la mejor calidad posible, con el menor factor de pérdidas, es decir con dieléctrico C0G y de un valor lo más elevado disponible. El valor de la R_1 se fijará como un compromiso entre la distorsión en frecuencia causada por la respuesta paso alto del conjunto y la pérdida de aislamiento del conjunto.

3.4.3 Evolución del diseño de FEE

Antecedentes

En esta sección procedemos a explicar la evolución del diseño del FEE a través de sus distintas versiones hasta alcanzar la versión 4 que es la que está instalada actualmente en el experimento.

El desarrollo se va a centrar en las versiones 3 y posteriores ya que en las versiones anteriores se empleó un esquema de conexión de ánodo a tierra donde no era necesario realizar el acoplo AC de la señal de salida. En las versiones anteriores el concepto de FEE no incluía la alimentación del PMT, ya que se llevaba a cabo a través de la propia base.

A continuación se detallan y desarrollan las diferentes versiones así como la versión que está actualmente instalada y funcionando en el detector NEXT-White.

²Cero introducido por $R_{par} \left(\frac{1}{R_{par}} \cdot C \right)$ que estaría cerca del polo dominante del circuito $\left(\frac{1}{R_{par} \parallel Z_{in} \cdot C} \right)$

FEE v3

Esta versión surge de incluir la etapa de alimentación e incluir el condensador de acoplo AC. Adicionalmente se añadió un diodo zener a modo de protección contra subidas de tensión, tratando de evitar daños al circuito posterior. En la figura 3.18 se puede ver el esquema descrito anteriormente.

Las resistencias R19 y R20, además de los condensadores C7 y C8 se utilizan para filtrar la alta tensión que alimenta a los PMTs. En esta versión se pusieron diferentes huellas para condensadores de acoplo para de ese modo poder probar varias combinaciones, modelos y valores de condensadores. Z1 y Z2 se decidieron poner como protección ante picos de tensión para evitar dañar la electrónica del canal. El amplificador diferencial utilizado en esta versión es el THS4511. Al tratarse del mismo modelo que se empleó en la versión final del *FEE*, este elemento se explicará detalladamente en la sección 3.4.3. Por otra parte, también se incluyó un driver diferencial (AD8131 de *Texas Instruments*) con salida adaptada a 50Ω para la correcta transmisión de la señal hasta el DAQ.

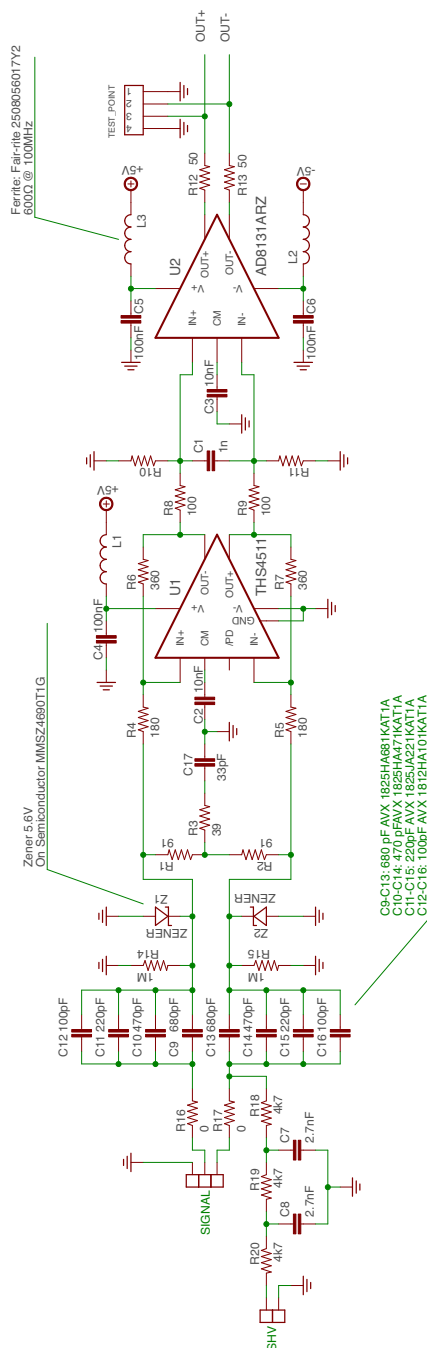


Figura 3.18: Esquema de la rama de alimentación del FEEv3

FEE v3.2

En esta versión se decidió añadir además de lo anterior una segunda etapa de amplificación para incrementar la ganancia en caso necesario. También se añadió un ajuste de offset manual mediante las resistencias R29, R30 y R31, junto con C20 y un potenciómetro de $5k\Omega$. Este nuevo ajuste se empleaba para modificar la línea de base de la salida del amplificador. En esta versión se mantuvo el driver diferencial a la salida del canal (figura [3.19](#)).

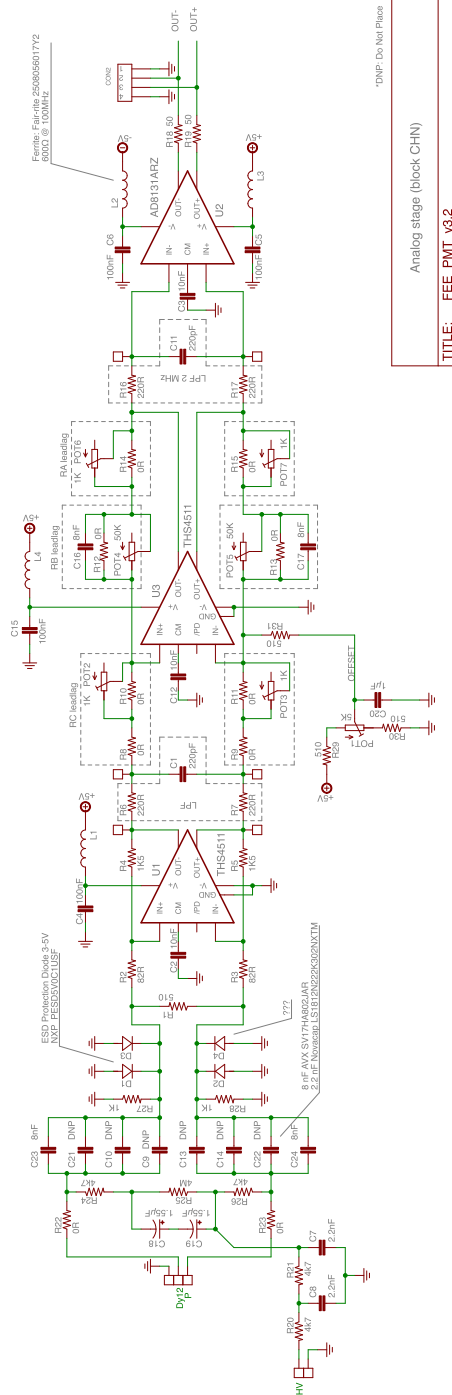


Figura 3.19: Esquema de la rama de energía del FEEv3.2

Con tal de mejorar el rendimiento del FEE se le realizaron modificaciones manuales a esta tarjeta electrónica, y tras su verificación se procedió a integrarlas al diseño anterior llegando a la versión 4 que se explica a continuación (figura 3.20 y figura 3.21).

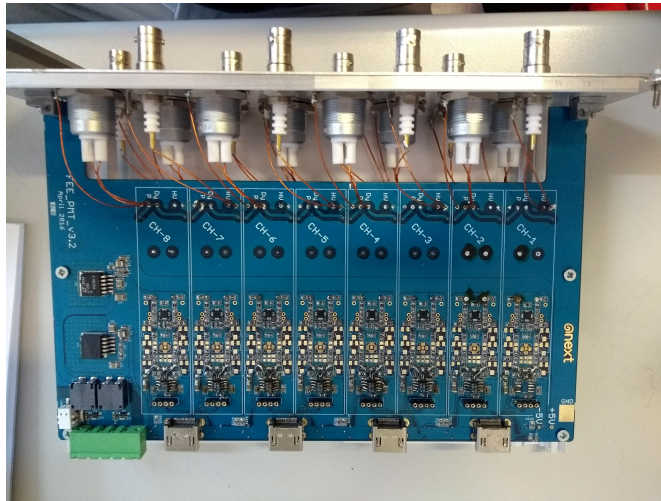


Figura 3.20: Fotografía del FEEv3.2 con modificaciones posteriores (Top)

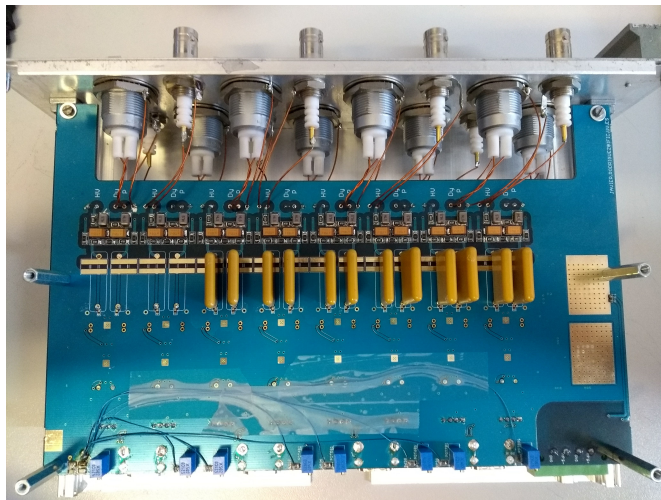


Figura 3.21: Fotografía del FEEv3.2 con modificaciones posteriores (Bottom)

FEE v4

Los componentes activos en el FEE se eligieron para minimizar el ruido. Se optó por utilizar la transmisión diferencial, ya que de esta manera es posible cancelar el ruido acoplado a la señal. El amplificador diferencial elegido fue el THS4511 de Texas Instruments (figura 3.22), que se caracteriza por alto ancho de banda, bajo ruido y baja distorsión. Después de la amplificación diferencial, la señal pasa a través de un filtro pasivo paso-bajo. Finalmente, se utiliza un controlador (*driver*) diferencial (LT6600 de *Analog devices*) que proporciona suficiente corriente para la transmisión al sistema de adquisición externo. El driver se decidió cambiar respecto a la versión anterior, ya que, este nuevo modelo utiliza la misma numeración de pin pero añade la funcionalidad de poder fijar un tensión DC de referencia directamente al driver. Además este último tiene un filtro paso-bajo de 5 MHz integrado en el componente.

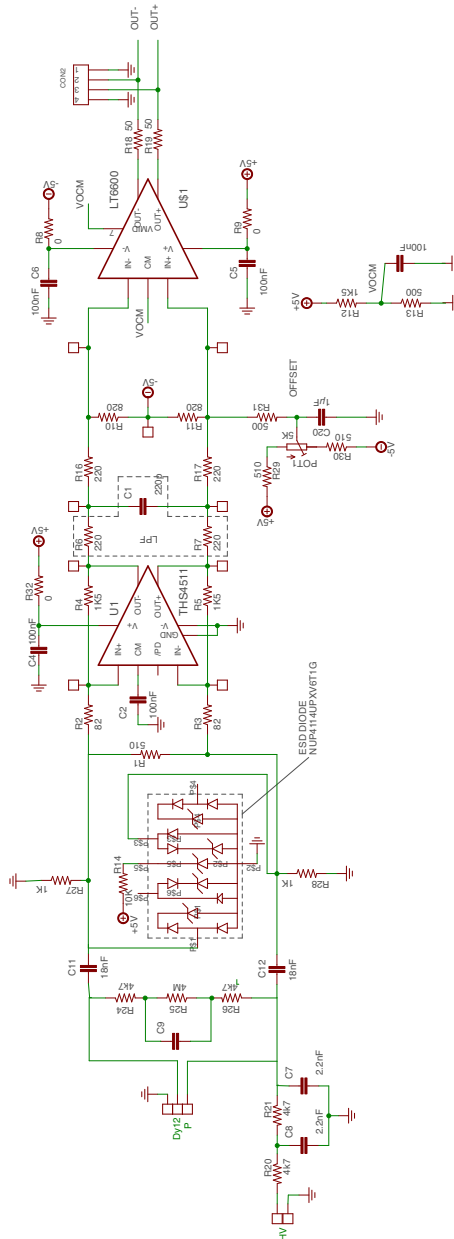


Figura 3.22: Esquema de la rama de energía

Según la configuración vista en el esquema, las resistencias R4 y R5 son las que definen la ganancia de la etapa amplificadora, pues se trata de un amplificador de transresistencia. Además, dichas resistencias deben ser del mismo valor, para que la amplitud de la señal en las dos líneas diferenciales sea la misma. En nuestro caso, se utilizaron resistencias de valor $1,5\text{ k}\Omega$ teniendo de ese modo una amplificación en corriente de 1500. Por otro lado, las resistencias R2 y R3 también deben ser iguales entre sí. Si esto último no se cumple, las ramas diferenciales estarían desequilibradas y se vería reflejado en un offset adicional a la salida. Mediante simulaciones, se determinó que el valor de las resistencias R2 y R3 debía ser de $82\text{ }\Omega$.

Tras el amplificador se encuentra el filtro paso-bajo, que es de gran importancia, pues además de atenuar ruido de alta frecuencia hace que la señal sea más ancha. Se necesita que una señal producida por un SPE (Single Photo Electron) se prolongue por encima de los 100 ns. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo del DAC (40 MHz, 25 ns) debe permitir adquirir la forma del pulso del spe manteniendo la suficiente resolución en la energía del mismo. Con 100 ns el número de muestras (4) es suficiente para cubrir una resolución mejor del 10 %. Con el objetivo de diseñar el conformado de la señal se emplea un modelo basado en la descarga exponencial de un condensador, en la que se decidió tomar como punto final de la señal el tiempo en que el valor descendiese por debajo del 25 % de la carga máxima. A partir de la ecuación de descarga del condensador puede calcularse que para obtener una descarga del 75 % de la tensión en 100 ns, la constante de tiempo τ debe ser:

$$V = V_o e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.24)$$

$$\tau = -\frac{t}{\ln\left(\frac{V}{V_o}\right)} = -\frac{100\text{ ns}}{\ln 0,25} = 72\text{ ns} \quad (3.25)$$

Para este filtro diferencial tenemos que tener en cuenta que la resistencia vista por el condensador C1 sería ($R6 \parallel (R18 + R10)$). Al ser un sistema diferencial

para hacer el cálculo de τ el valor del condensador que ven las resistencias será el doble $C1_1 = 440 \text{ pF}$ como se muestra en la figura 3.23.

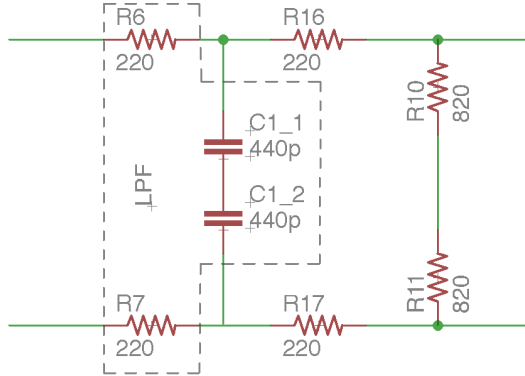


Figura 3.23: Detalle del filtro paso-bajo (Realmente solo existe un condensador C_1 de 220 pF, en el dibujo se ven 2 debido a que cada rama ve como si tuviera su propio condensador ($C1_1$ y $C1_2$) del doble de capacidad)

Aplicando los cálculos anteriores, la constante de tiempo viene dada por la expresión $\tau = (R6 \parallel (R18 + R10)) \cdot C1_1$.

$$\tau = (R6 \parallel (R18 + R10)) \cdot C1_1 \quad (3.26)$$

Utilizando $R6$ y $R16 = 220 \Omega$ y $R10 = 820 \Omega$, la ecuación es:

$$\tau = (220\Omega \parallel (220\Omega + 820\Omega)) \cdot 440\text{pF} \quad (3.27)$$

$$\tau = \left(\frac{220\Omega \cdot 1k04\Omega}{220\Omega + 1k04\Omega} \right) \cdot 440\text{pF} \quad (3.28)$$

$$\tau = 181,6\Omega \cdot 440\text{pF} = 79,9\text{ns} \quad (3.29)$$

Como τ debía ser mínimo 72 ns, con el valor de resistencias aplicadas en la ecuación anterior se cumple con dicha condición. Los valores finalmente asignados que se observan en la figura 3.22, se validaron mediante simulación y consiguen prolongar la señal por encima de los 250 ns para una descarga del 75 % (figura 3.25).

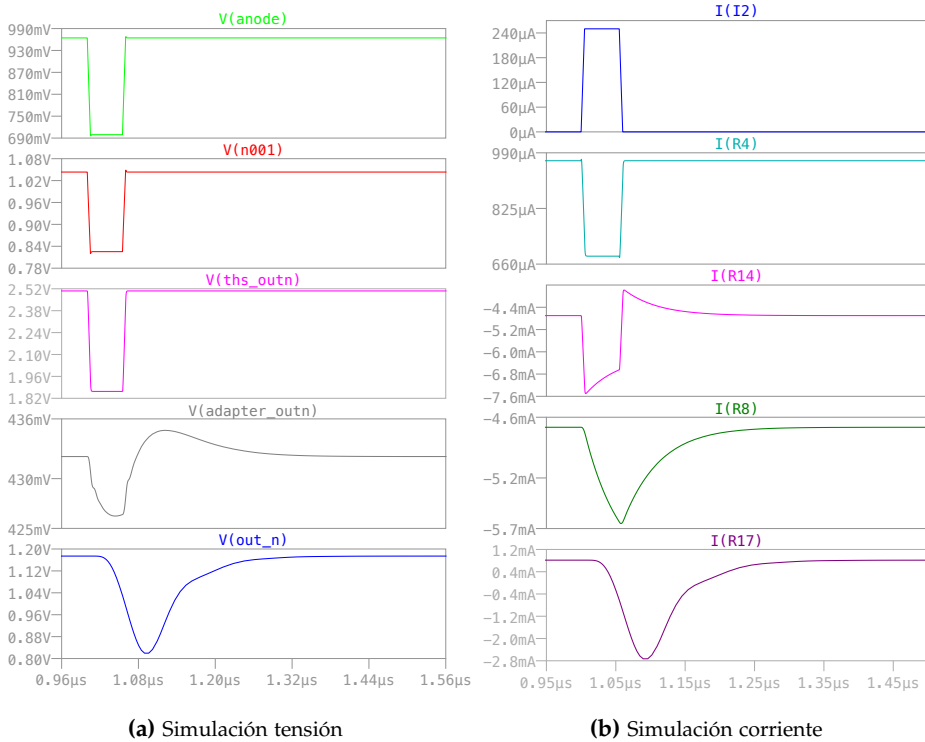


Figura 3.24: Gráficas de la simulación de la rama negativa en LTspice.

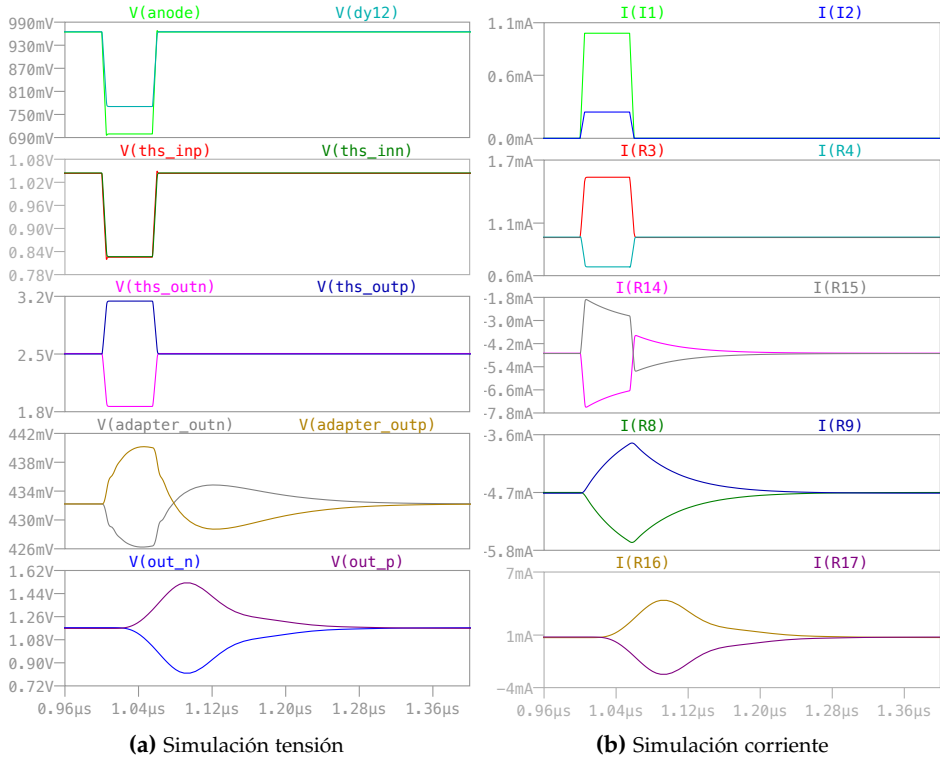


Figura 3.25: Gráficas de la simulación de la rama negativa en LTspice.

La frecuencia de corte del filtro paso bajo es de 2MHz. El ancho de banda del FEE (2 MHz) lo hace funcionar como un filtro de conformación, extendiendo la duración del tiempo de respuesta de fotoelectrón único que fue proporcionado como una especificación por el equipo de calibración del detector.

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi(R6 \parallel (R18 + R10)) \cdot C1_1} \quad (3.30)$$

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi\left(\frac{220\Omega \cdot 1k04\Omega}{220\Omega + 1k04\Omega}\right) \cdot 440pF} = 2MHz \quad (3.31)$$

Por otra parte, se ha introducido un ajuste de offset mediante un divisor resistivo y un potenciómetro de 5 k Ω , este ajuste de offset se utiliza para poder tener control sobre la línea de base y evitar que las señales saturen, permitiendo de ese modo, aprovechar al máximo el rango dinámico de la FPGA del DAQ.

Al ser diferencial, tenemos dos señales opuestas, debido a esto es posible que si la línea de base no está en lugar adecuado pueda saturar una de las dos señales, lo que equivale a una deformación en la señal final tras restarlas y después de ser decodificada en el DAQ. Lo que permite el potenciómetro es poder separar ambas señales con una diferencia constante entre ellas (figura 3.26c), y así situar la línea de base en un lugar diferente a cero, ampliando de ese modo el rango dinámico para nuestra señal (figura 3.26d). Es necesario comprobar el nivel de offset de las señales diferenciales por separado para evitar efectos de saturación como los descritos en la figura 3.27.

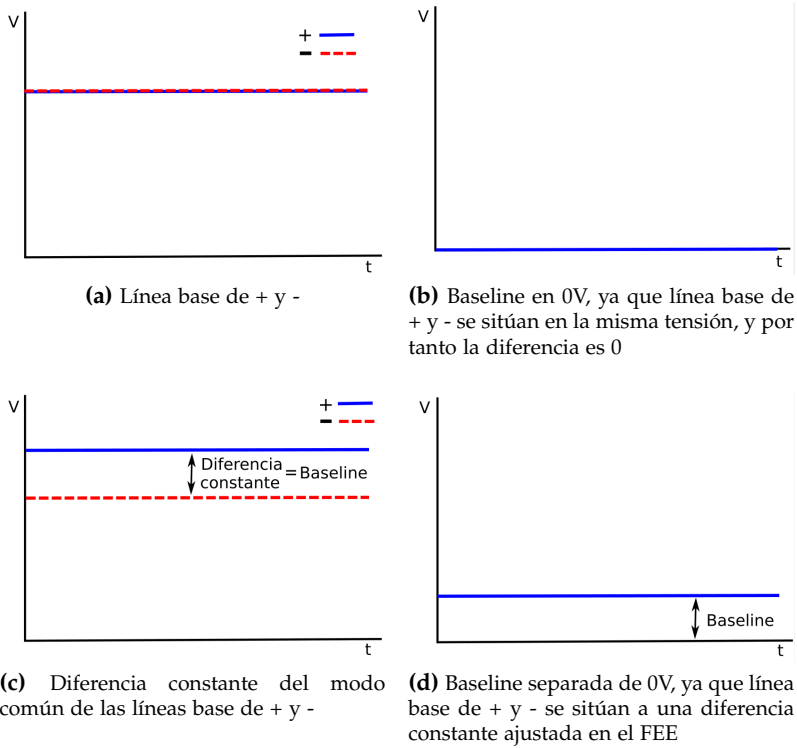


Figura 3.26: Explicación gráfica del ajuste del modo común

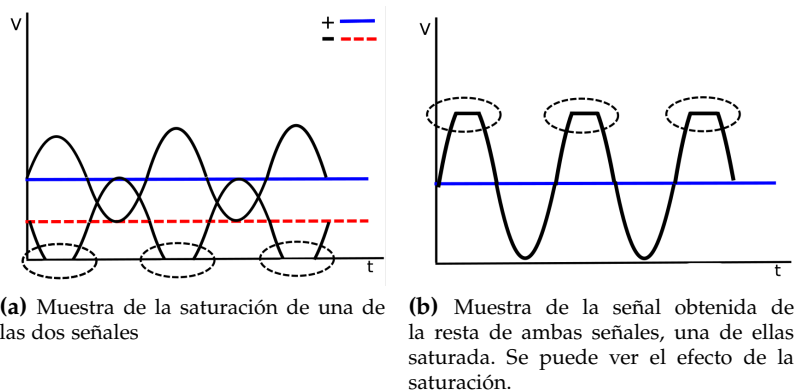


Figura 3.27: Explicación del efecto saturación debido a la posición de la línea base.

En la figura 3.28 se puede observar una captura real de la señal adquirida por el DAQ. Presenta un nivel base de 2050 cuentas aproximadamente, debido al ajuste del offset realizado.

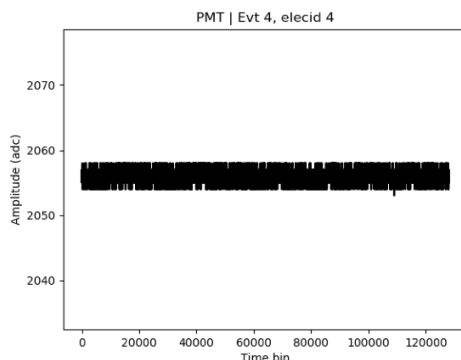
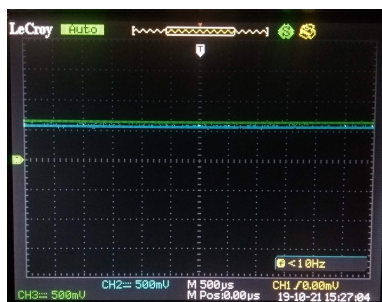
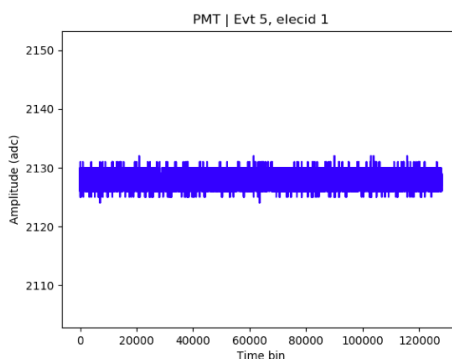


Figura 3.28: Baseline en 2050 cuentas, lo que equivalente aproximadamente a 0V, ya que el rango completo son 4000 cuentas de ADC

A continuación se muestran las dos señales reales de *FEE* con su correspondiente imagen de la señal procesada después del sistema de adquisición, en las figuras 3.29 y 3.30. En ellas se puede apreciar el cambio de la línea de base dependiendo de la diferencia entre las señales de salida.



(a) Diferencia entre señales a la salida del FEE



(b) Baseline en 2130 (aprox. 65 mV) debido a la distancia entre señales del modo común.

Figura 3.29: Imágenes reales con el efecto del modo común

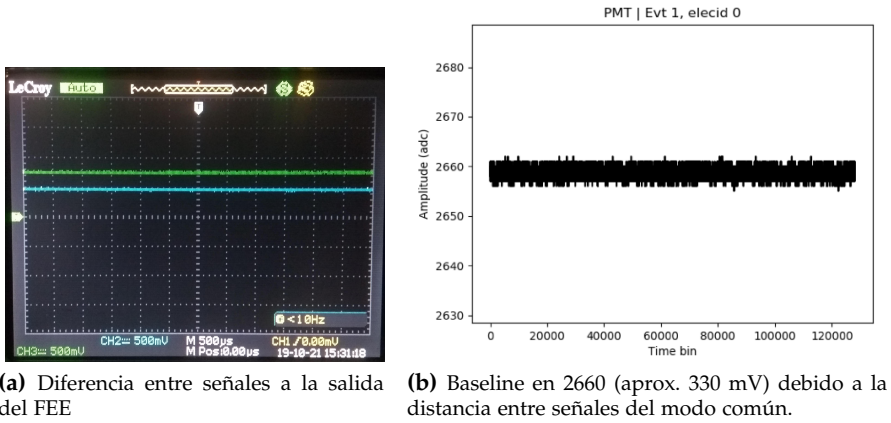


Figura 3.30: Imágenes reales con el efecto del modo común

Otra parte importante de la rama de energía, son los condensadores de acoplo AC (C11 y C12), éstos han sido elegidos de 18 nF con un dieléctrico C0G, porque ofrecen excelentes propiedades como alta estabilidad térmica, alta capacidad de corriente de ondulación, bajo cambio de capacitancia con respecto al voltaje de DC aplicado y sin disminución de capacidad con el tiempo.

En cuanto a la protección, tenemos un diodo de protección ESD, modelo NUP4114UPXV6T1G. Con él intentamos evitar que se dañe el sistema de adquisición de forma irreparable debido a sobretensiones.

El filtrado en la alta tensión de entrada se realiza con dos filtros paso-bajo. Los valores de resistencia de R20 y R21 es de 4,7 kΩ y de condensador los condensadores C7 y C8 es de 2,2 nF. A continuación se muestra el cálculo de la frecuencia de corte:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (3.32)$$

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi \cdot 4k7 \cdot 2,2nF} = 15,4kHz \quad (3.33)$$

La frecuencia de corte del filtro paso-bajo en la entrada de la alimentación es de 15,4 kHz.

Para finalizar con el diseño de la rama de energía, comentar que se añadieron las resistencias R27 y R28 para poder descargar la alta tensión, en caso de que se desconectara el cable del FEE con la alta tensión aplicada. Además, cabe destacar que las resistencias R24 y R25 y R26 junto al condensador C9 están en la entrada del canal para completar el divisor resistivo de la base de polarización, esto corresponde a la parte del divisor entre el último dínodo y el ánodo, ajustando de esta manera la tensión en el PMT de manera correcta.

3.4.4 Simulación en Pspice

Para comprobar el correcto funcionamiento del diseño se procedió a realizar la simulación del circuito diseñado con el programa LTspice. En la figura 3.31 se puede observar el esquemático empleado.

En la simulación se incluye la última etapa del PMT donde se forma la señal de salida, es decir los terminales de ánodo y el último dínodo. Ambos se modelizan como fuentes de corriente y se incluyen todos los elementos de la base asociados: resistencias, condensadores etc. La fuente de corriente del ánodo genera un pulso negativo la del último dínodo genera un pulso positivo de menor amplitud. El diseño de la base, se explica con detalle en la sección 3.6. Los pulsos de corriente empleados simulan el paso de un SPE, es decir, un solo electrón emitido por el fotocátodo figura 3.32..

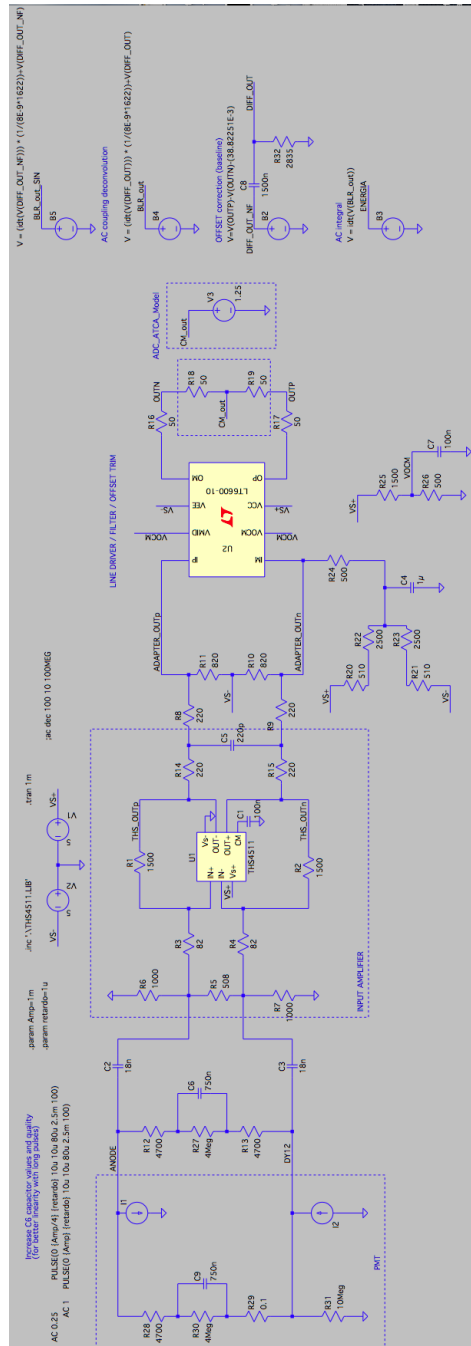


Figura 3.31: Esquema de la simulación en LTspice

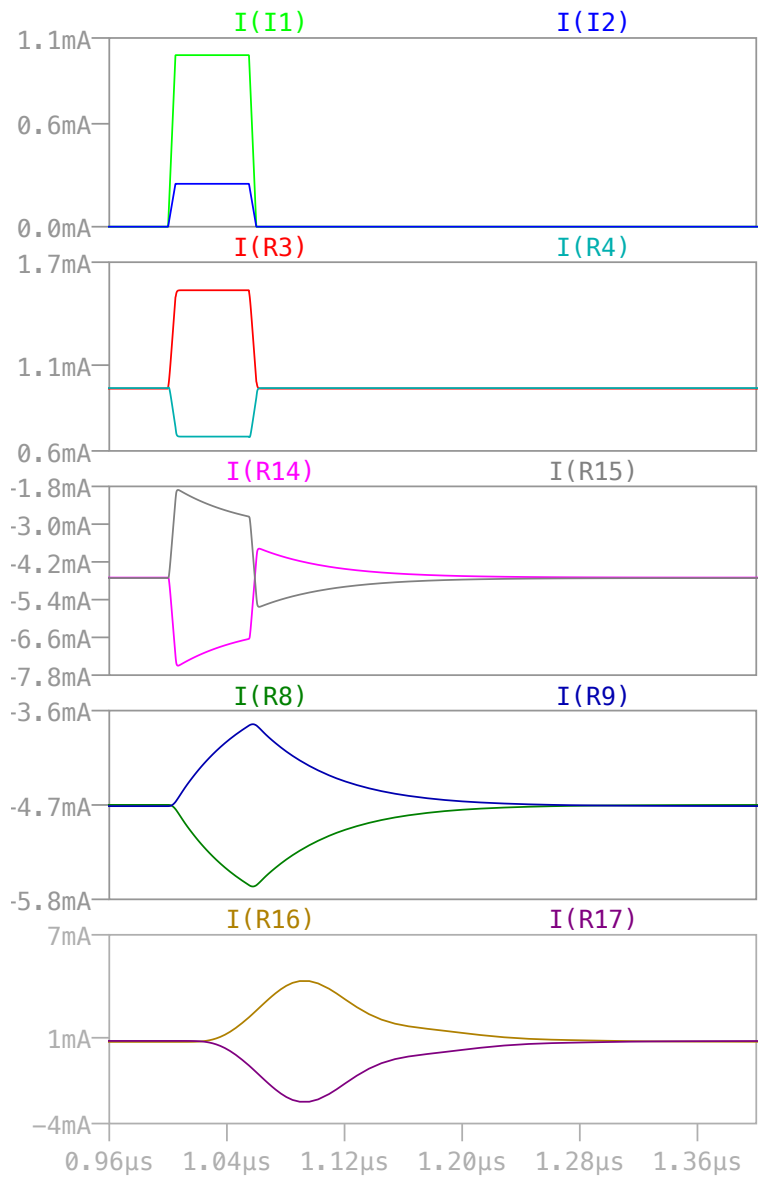


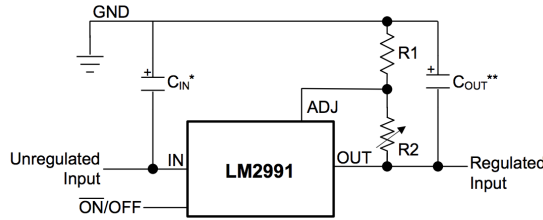
Figura 3.32: Resultado de la simulación

3.4.5 Etapa de alimentación

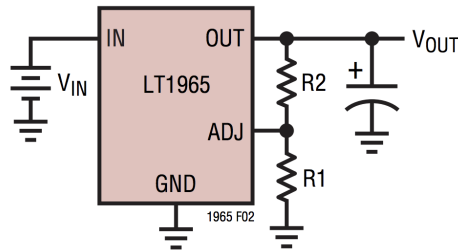
La etapa de alimentación de la tarjeta de acondicionamiento de señal tiene un efecto crucial en el comportamiento de la electrónica de FEE. La alimentación debe poseer una protección contra sobrecorrientes, y además un sistema de filtrado que garantice estabilidad y elimine el máximo de ruido posible.

Para los componentes que forman el circuito, es suficiente con proveer tensiones de $\pm 5\text{V}$, por lo que se escogieron los reguladores de tensión LT1965IQ, para el caso de $+5\text{V}$, y de LM2991S, para -5V . Para su elección se hizo una estimación del consumo de corriente previsto para la tarjeta: conociendo el consumo de un canal se estimó el consumo total de la tarjeta con 8 canales. Añadiendo un margen de seguridad, se obtuvo un consumo máximo de esta tarjeta de 500mA en el caso de la línea de -5V , y de 1A en el caso de la línea de $+5\text{V}$.

Además se buscó que la caída de tensión a través del regulador fuese la menor posible, ya que esto reduce el consumo de dicho componente y evita el sobrecalentamiento. Ambos reguladores se encuentran dentro del grupo de los llamados LDO (Low Voltage Dropout), en el caso del regulador LM2991S, la caída de tensión entre entrada y salida es de $0,6\text{V}$ y en el LT1965IQ de $0,31\text{V}$. Los reguladores escogidos permiten ajustar la tensión de salida mediante la asignación de un voltaje en el terminal de ajuste. Esto se hace utilizando un divisor resistivo, tal y como se muestra en las figuras [3.33a](#) y [3.33b](#).



(a) Ajuste del regulador de -5V (datasheet de Texas instruments)



(b) Ajuste del regulador de +5V (datasheet de Linear technology)

Figura 3.33: Detalle de los ajustes para la regulación de las tensiones de entrada.

Según indica el fabricante del regulador LM2991S, la resistencia R_2 debe ser inferior a $100\text{ k}\Omega$, ya que utilizar una resistencia de valor superior provocaría un error en la tensión de salida por efecto de la corriente de entrada al pin de ajuste. La resistencia R_1 se puede obtener de la expresión:

$$V_{OUT} = V_{ADJ} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.34)$$

Donde V_{ADJ} se fija internamente y es $V_{ADJ} = -1,21\text{V}$.

De donde obtenemos, por aproximación al valor estándar más próximo, una resistencia R_1 de $30\text{ k}\Omega$.

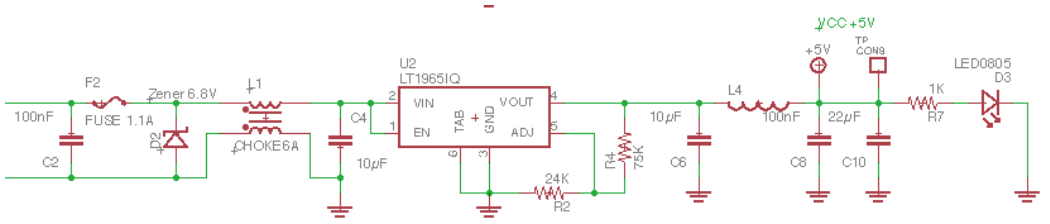


Figura 3.34: Esquema de la alimentación de +5V.

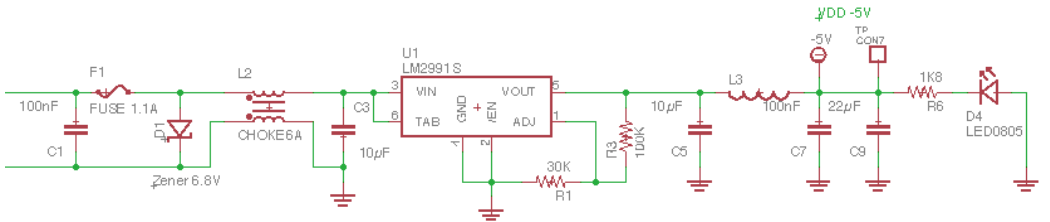


Figura 3.35: Esquema de la alimentación de -5V.

En el caso del regulador LT1965IQ, las resistencias R2 y R1 se pueden obtener de la expresión:

Donde $V_{ADJ} = 1,20V$ y $I_{ADJ} = 1,3\mu A$ a $25^{\circ}C$.

$$V_{OUT} = V_{ADJ} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + I_{ADJ} \cdot R2 \quad (3.35)$$

de donde obtenemos, una resistencia R1 de 24kΩ y R2 de 75kΩ.

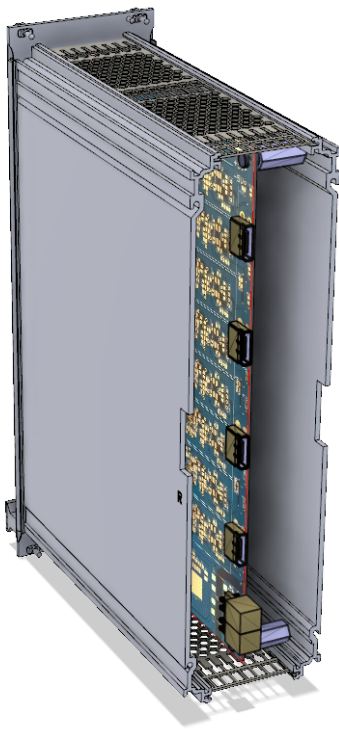
Respecto a la protección del circuito, se añadieron fusibles autorrearmables a la entrada de cada línea de alimentación. Se consideró adecuado un margen de seguridad mínimo del 25 % tomando de entre los disponibles los valores de 1A y 1,5A respectivamente. Estos fusibles desconectan la entrada en caso de excederse la corriente máxima, pero vuelven a establecer la conexión cuando se desconecta la alimentación durante un pequeño espacio de tiempo.

A continuación, en las figuras 3.34 y 3.35 puede verse la etapa de alimentación.

En lo referente al filtrado de la alimentación, es exactamente el mismo para las dos tensiones de entrada. En la primera etapa se encuentra un condensador de 100 nF, como primer filtrado de componentes frecuenciales altas, y el fusible comentado anteriormente como protección. Tras el filtrado se incluyó un choque de modo común, el cual bloquea las corrientes en modo común entre la alimentación y masa, evitando los perjudiciales bucles de masa. A continuación están los reguladores de tensión, con etapas de filtrado tanto para bajas como altas frecuencias, así como una ferrita que atenúa los cambios bruscos de corriente que pueden producir niveles de tensión incorrectos en las líneas de alimentación. Con estos filtros se evita en gran medida la aparición de ruido, así como gran cantidad de armónicos.

3.4.6 Diseño mecánico

Para poder colocar los conectores tanto de alimentación como de señal, y además poder ensamblar las tarjetas de FEE en un bastidor de tamaño 6U, se procedió a mecanizar un chasis para módulos 6U. Los paneles superior e inferior tienen perforaciones para carriles de guía (permitiendo un flujo de aire proveniente de la bandeja de ventiladores de aproximadamente el 60 %) para inserción de una placa de circuito impreso. Las medidas son 167 mm de profundidad, 70 mm de ancho y 262 mm la parte más alta. En la figura 3.36 se muestra un dibujo 3D de la caja y una foto de la misma montada. Dentro de la caja el FEE se sujeta a la caja mediante separadores de métrica M3 de 20 mm de longitud y tornillos de cabeza cónica. En el caso de los conectores del frontal de la caja se eligieron por una parte, para alimentar de alta tensión los PMTs, conectores SHV que pueden trabajar hasta 5000 V. Por otra parte, para poder utilizar un único cable para alimentar y obtener la señal del PMT, se necesitaba un conector que tuviera 2 polos y que soportara la tensión de trabajo necesaria, se optó por un conector de la empresa LEMO, en concreto el modelo ERA.3S.432.CLL, que puede trabajar a 2,1 kV rms, además de cumplir las especificaciones, este conector fue elegido por su conocida fiabilidad.



(a) Dibujo 3D

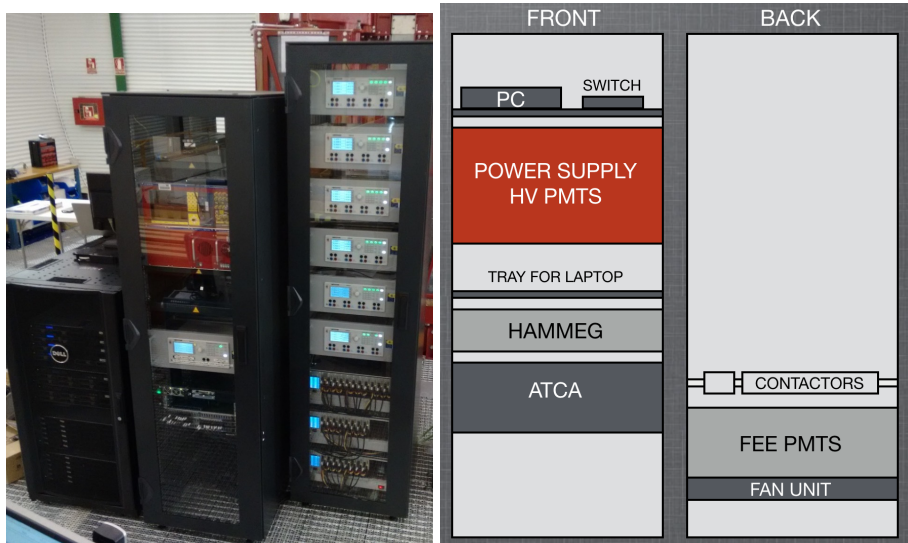


(b) Caja montada

Figura 3.36: Caja metálica mecanizada

Esta caja se encuentra en el armario electrónico (figura 3.38a) cerca del sistema de adquisición. Un cable HDMI es el medio físico elegido para la conexión entre la placa FEE y el DAQ, ya que el DAQ de 20 MSa/s pertenece a la colaboración RD-51 donde se escogió este medio físico para las conexiones. Una frecuencia de muestreo en el DAC una década superior al ancho de banda de la señal FEE (2 MHz), debería ser suficiente para adquirir señales de salida FEE con una distorsión de frecuencia despreciable incluso si se utilizan filtros Nyquist de orden bajo.

El equipo para proporcionar la alta tensión a los PMT es un sistema de suministro de energía multicanal universal, modelo SY 1527 de CAEN con la tarjeta A1733P: voltaje de salida de 0-4 kV y <30 mVpp de rizado.



(a) Armarios electrónicos del detector NEW (b) Esquema de la distribución dentro del armario con la electrónica, parte delantera y trasera

Figura 3.37: Armarios electrónicos del experimento.

En la figura 3.38a se pueden ver los diferentes armarios que tienen la electrónica, en el centro de la imagen se puede observar el armario que corresponde a la electrónica del plano de energía, en la figura 3.38b se muestra la distribución, tanto delantera como trasera, del armario con la electrónica necesaria para el plano de energía.

3.4.7 Diseño de la PCB

Para el diseño del Layout se tuvieron en cuenta varios factores. El primero de ellos fue el tamaño de la tarjeta electrónica y su forma. Las medidas de la tarjeta deben permitir su integración en un bastidor metálico de tamaño 6U incluyendo el tamaño de la caja que la alberga.

Se decidió que la tarjeta fuera de 2 capas con plano de masa en ambas caras. Además la masa de entrada y la del resto de la tarjeta se separaría a través de los inductores de modo común (chokes). Por otra parte, las pistas

de alimentación se dimensionaron para permitir que la caída de tensión en el peor caso fuera despreciable. En cuanto a componentes, el más delicado era el amplificador diferencial THS4511, para el cual se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones del fabricante:

- 1 El enrutamiento de la señal debe ser directo y lo más corto posible dentro y fuera del circuito amplificador operacional.
- 2 La ruta de retroalimentación debe ser corta y directa; evitar vías.
- 3 Los planos de tierra o de alimentación se deben quitar directamente debajo de los pines de entrada y salida del amplificador.
- 4 Se recomienda una resistencia de salida en cada salida, lo más cerca posible del pin de salida.
- 5 Dos condensadores de desacoplo de la fuente de alimentación de $10\ \mu\text{F}$ y dos de $0,1\ \mu\text{F}$ deben colocarse lo más cerca posible de los pines de la fuente de alimentación.
- 6 Se deben colocar dos condensadores de $0,1\ \mu\text{F}$ entre los pines de entrada CM y tierra. Esta configuración limita el ruido acoplado a los pines. Cada uno debe colocarse a tierra cerca del pin 4 y el pin 9.
- 7 Se recomienda una conexión de un solo punto a tierra para las resistencias de terminación de entrada R1 y R2. Esta configuración debe aplicarse a las resistencias de ganancia de entrada si no se utiliza la terminación.

3.4.8 Medidas de ruido

Para verificar las especificaciones del diseño, se ha realizado mediciones de ruido en el laboratorio y en la instalación de NEXT en el laboratorio subterráneo de Canfranc. Las medidas están relacionadas con el bit menos significativo (LSB) del sistema de adquisición de datos (DAQ). El DAQ ofrece 12 bits efectivos (ENOB) en un rango de entrada de 2V ($\text{LSB} = 0,49\ \text{mV}$). No se tuvieron en cuenta los efectos de ruido de fondo ya que su efecto es despreciable en las condiciones experimentales. Los resultados se muestran en la tabla [3.1](#).

Cuadro 3.1: Noise Measurements (in LSB_{rms})

		Laboratory	LSC NEXT
Direct Measurement	DAQ	0,64	0,66
	FEE + DAQ	0,75	0,75
	FEE + DAQ + PMT	0,76	0,8
Indirect Measurement	FE	0,39	0,36
	PMT	0,12	0,28

El peor de los casos de ruido total es $0,8\ LSB_{rms}$, que está dentro de las especificaciones. El ruido calculado teóricamente del FEE fue de $0,35\ LSB$ sin contribución de la fuente de alimentación de los PMT. La contribución de ruido del FEE medida indirectamente es $0,36\ LSB$, muy cerca de los cálculos teóricos. El ruido restante se puede atribuir al sistema DAQ.

Las medidas de ruido realizadas en el laboratorio mostradas en la tabla 3.1 fueron realizadas con la cadena completa de señal montada en una caja negra (PMT + base + pasamuros + FEE + HDMI + DAQ). Una vez se habían tomado datos reales con el sistema completo, el ruido se calculó como la desviación estándar de un periodo tiempo anterior a la aparición de señal en los PMT. Es decir se toma la línea de base desechando los primeros puntos, y los últimos antes del inicio de señal. Para poder realizar las medidas en el LSC se preparó una pequeña caja negra portátil en la que dentro se replicaba en mismo montaje que en el laboratorio.

3.4.9 Modelo del FEE para simulación

Una vez que el diseño ha sido validado a través de mediciones reales, es de gran importancia construir un modelo de simulación que pueda ayudar en el desarrollo de otras partes del proyecto. El modelo tiene un alto nivel de abstracción para poder integrarse fácilmente con los módulos de análisis de software. Se escogió el lenguaje Python con la ayuda de las bibliotecas Numpy-Scipy, ya que el resto de módulos de análisis de software fueron desarrollados empleando este mismo lenguaje. El modelo comprende dos elementos diferentes, el rango de baja frecuencia que se desarrolló en la sección

anterior (ec. 3.16) más un filtro paso bajo de cuarto orden, que aporta la conformación requerida según las especificaciones del sistemas de adquisición. Adicionalmente el modelo también incluye un ajuste de ganancia obtenido en las mediciones reales. La respuesta del modelo se comparó con las simulaciones PSPICE del FEE para comprobar su validez a nivel de respuesta en frecuencia (figura 3.38).

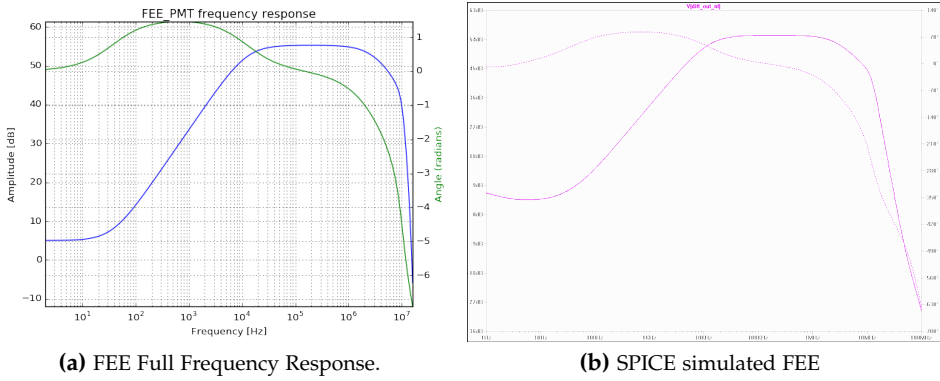


Figura 3.38: FEE model check.

El ruido se introduce en el sistema para parecerse al comportamiento del ruido del sistema real, teniendo en cuenta el efecto de filtrado de cada parte. Esto implica que el ruido de entrada equivalente del FEE debe calcularse para mostrar su efecto correcto con el ancho de banda necesario para la conformación del pulso (3.4.3). El modelo de ruido equivalente del FEE se muestra en la figura 3.39 así como las ecuaciones de ruido relativas a las diferentes contribuciones.

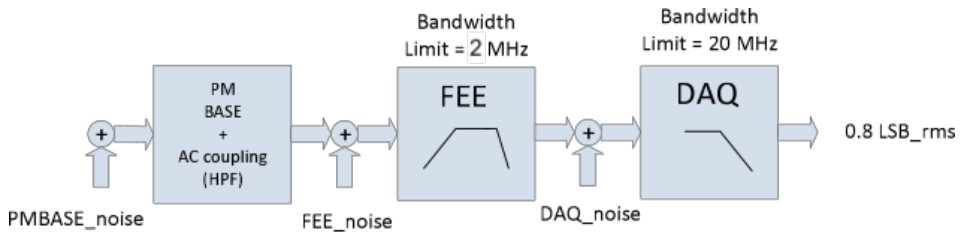


Figura 3.39

Donde la ganancia total (GAIN) es la ganancia del FEE (FEE_{GAIN}) multiplicada por la ganancia del sistema de adquisición (DAQ_{GAIN}).

$$GAIN = FEE_{GAIN} \cdot DAQ_{GAIN} \quad (3.36)$$

Además, el ruido total (vo_{Tn}^2) es el ruido de salida del DAQ ($v_{DAQnoise}^2(out)$) más el ruido de la FEE, más el ruido de la base PMT ($v_{F+Pn}^2(out)$).

$$vo_{Tn}^2 = v_{DAQnoise}^2(out) + v_{F+Pn}^2(out) \quad (3.37)$$

$$vo_{Tn}^2 \Leftrightarrow vo_{TOTALnoise}^2 \quad (3.38)$$

$$v_{F+Pn}^2 \Leftrightarrow v_{FEE+PMT-Basenoise}^2 \quad (3.39)$$

$$vo_{Tn}^2 = \int_0^{BW=2MHz} v_{F+Pn}^2 \cdot |G.H(jw)|^2 \quad (3.40)$$

$$+ \int_0^{BW=20MHz} v_{DAQn}^2 \cdot |DAQ_G.H(jw)|^2 \quad (3.41)$$

$$|G.H(jw)|^2 \Leftrightarrow |GAIN.H(jw)|^2 \quad (3.42)$$

$$v_{DAQn}^2 \Leftrightarrow v_{DAQnoise}^2 \quad (3.43)$$

$$|DAQ_G.H(jw)|^2 \Leftrightarrow |DAQ_{GAIN}.H(jw)|^2 \quad (3.44)$$

$$vo_{Tn(rms)} = \sqrt{vo_{Tn}^2} = 0,76LSB_{rms} \quad (3.45)$$

$$vo_{Tn(rms)} \Leftrightarrow vo_{TOTALnoise(rms)} \quad (3.46)$$

$$(3.47)$$

3.5 Algoritmo BLR

Para una correcta interpretación de los datos, era necesario implementar un algoritmo que restaurara la línea de base así como la forma del pulso, ya que, al pasar la señal por el condensador de acoplo ésta cambia de forma. A continuación se muestra la salida del FEE donde se puede ver el efecto del condensador de acoplo, tanto en simulación (figura 3.40) como en señal real (figura 3.41). En este capítulo se desarrolla la implementación de dicho algoritmo.

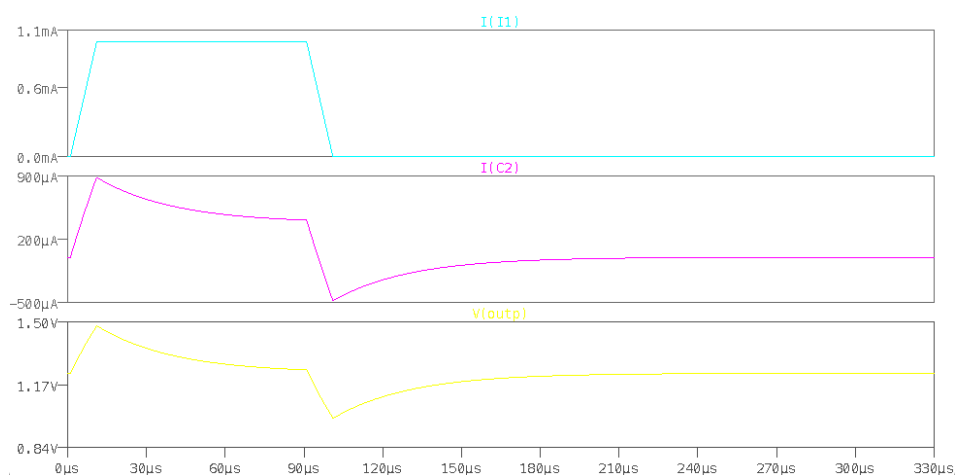


Figura 3.40: Simulación del efecto del condensador de acoplo en PSPICE. Pulso de corriente que entra en el condensador (arriba), pulso de corriente después del condensador (centro) y pulso de tensión a la salida del FEE (abajo).

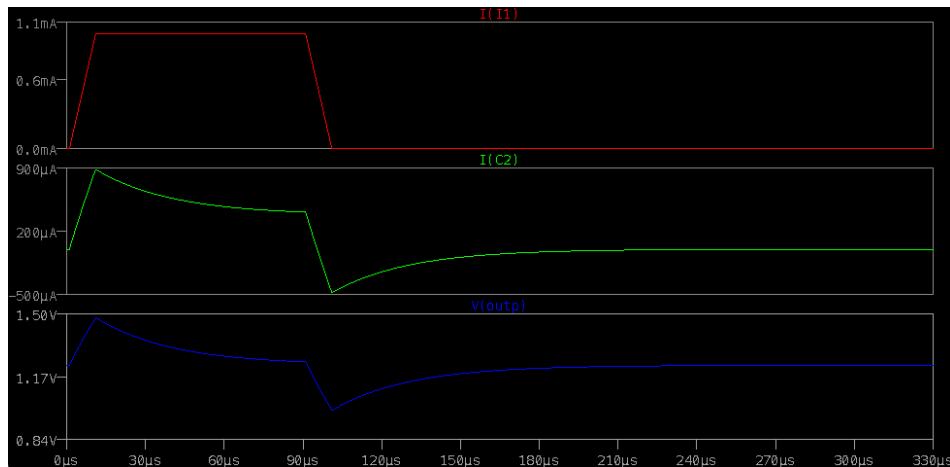


Figura 3.41: Salida real del FEE con el efecto del condensador de acoplo.

3.5.1 Implementación del algoritmo de la restauración de la línea base

La implementación analógica del BLR [INC s.f.] [M. J. Schmand y Zhang 2011] [Pullia y others. 1996] es muy compleja debido a que depende del conocimiento de valores de componentes parásitos y su exactitud esta sujeta a una posible evolución de los mismos tanto en el tiempo como entre distintos lotes de fabricación, utilizando una aproximación digital todos estos efectos pueden compensarse con un algoritmo de calibración apropiado.

El algoritmo de restauración de línea de base (BLR) se basa en la implementación de la función inversa de un filtro paso alto (figura 3.42), ya que el condensador de acoplo del FEE actúa como un filtro paso alto. La respuesta al impulso de esta función inversa tiene una estructura compuesta por una función delta en el origen, más una función escalón cuya amplitud es igual al valor de $\frac{1}{\tau}$ donde τ es $(R_1 + Z_{in}) \cdot C$ (equation 3.48). Esto significa que la operación de convolución se puede llevar a cabo utilizando solo un acumulador y un multiplicador en lugar de un filtro de respuesta de impulso finito (FIR) más complejo.

$$\begin{aligned}
 HPF^{-1}(s) &= 1 + \frac{1}{\tau s} \\
 HPF^{-1}(t) &= \delta(t) + \frac{1}{\tau} \int_0^t dt
 \end{aligned}
 \tag{3.48}$$

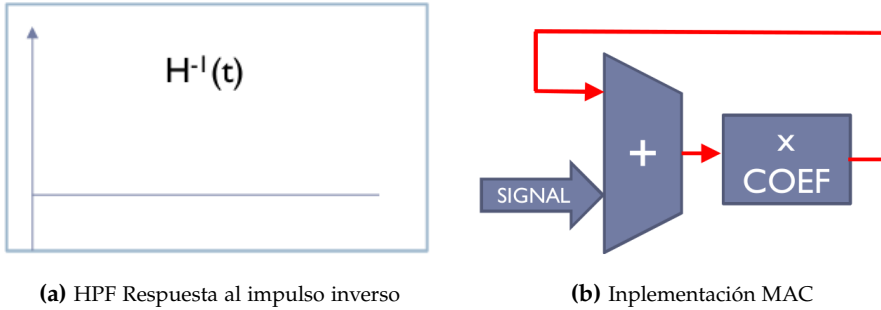


Figura 3.42: Implementación inversa de HPF.

Una buena característica de este algoritmo es que puede activarse cuando se detecta un pulso y luego apagarse cuando el pulso termina. Esto significa que una cantidad considerable de ruido de baja frecuencia filtrado por el condensador de acoplo AC no se volverá a introducir en el sistema, ya que es más lento que la longitud del pulso. Por otro lado, el cero de baja frecuencia introducido por la interacción de la base del PMT agrega una cantidad reducida de DC a la señal de salida teóricamente acoplada en AC del FEE. Para cancelar este efecto, se introduce un filtro paso alto anterior al algoritmo BLR, con una frecuencia de corte igual a la frecuencia de este cero. Esto cancela completamente el efecto DC para que la señal reconstruida no muestre un cambio en la línea de base final.

Cualquier algoritmo basado en un simple acumulador es sensible al ruido de media no nula. En particular, los componentes residuales de baja frecuencia cuyos periodos son más largos que la ventana de muestreo (ventana de tiempo de señal completa) son propensos a dejar un pequeño residuo dentro del acumulador. Dicho residuo introduce un error en el valor de la línea de base que tiene su origen en el ruido de media no nula.

El algoritmo BLR controla la evolución del acumulador utilizando un mecanismo que permite eliminar de forma controlada el residuo que queda en él después de la reconstrucción de un pulso. El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en figura [3.43](#).

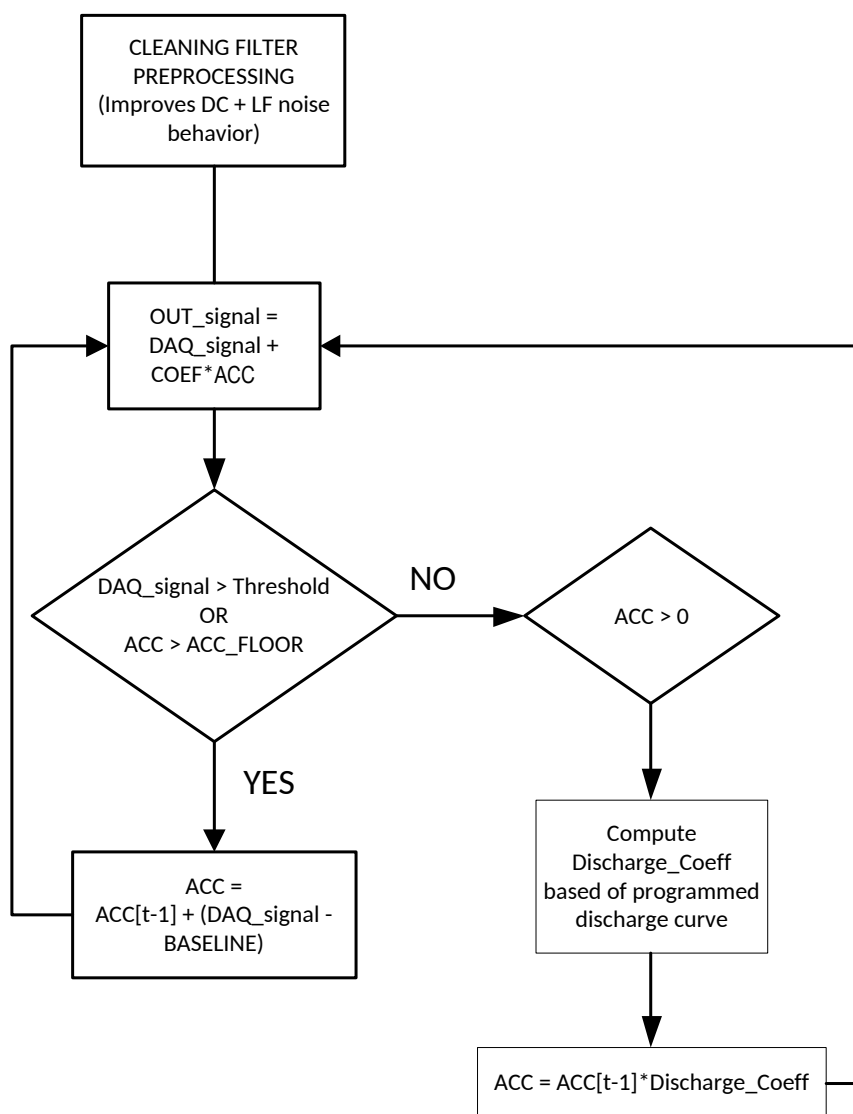
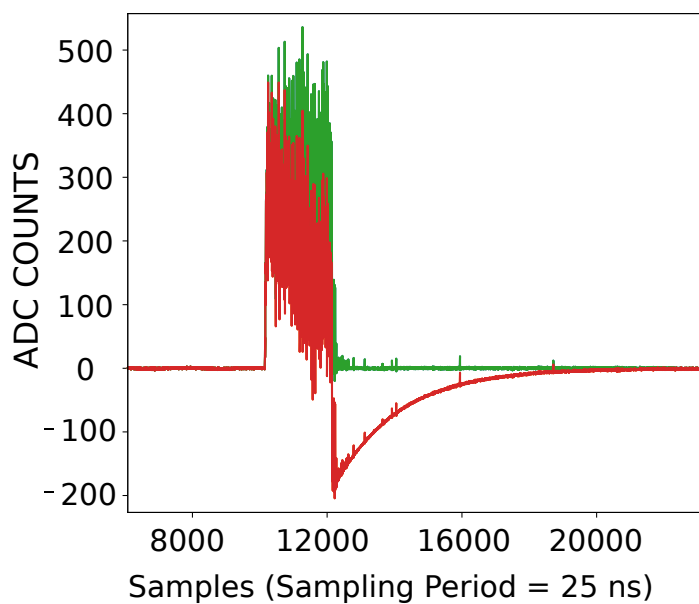


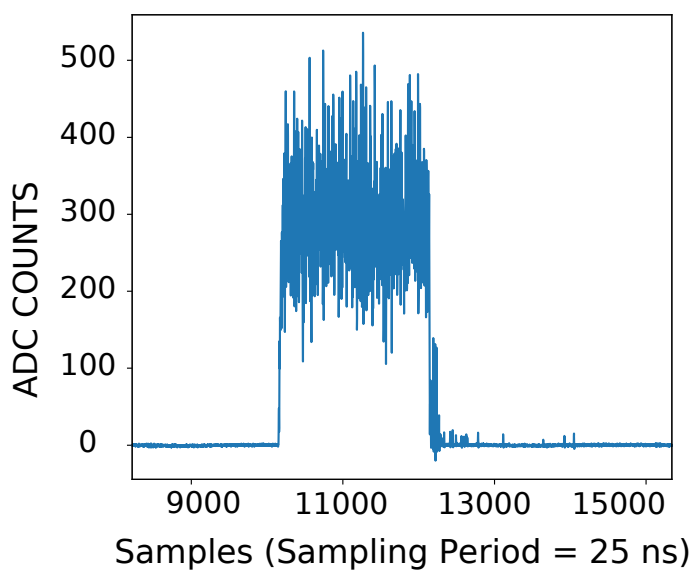
Figura 3.43: Acumulador basado en BLR.

Se observó que en este algoritmo, el proceso de reconstrucción se inicia independientemente del comienzo del pulso y, en principio, puede estar activo

de forma continua. El control se basa en las operaciones del acumulador que pueden ser *carga* o *descarga*. Cuando la señal sin procesar (proveniente del DAQ) se eleva por encima de un umbral o el valor del acumulador está por encima de otro umbral (que es la condición para un impulso activo), el acumulador se actualiza como en el algoritmo original. Sin embargo, cuando no se cumple ninguna de esas condiciones, lo que significa que no hay un impulso de señal activo, entonces el acumulador se ve forzado a un estado de descarga controlada. Esta operación de descarga se lleva a cabo siguiendo una curva suave para que la señal reconstruida no muestre saltos o discontinuidades. Como ejemplo de la acción del algoritmo BLR, la figura 3.44 muestra la señal de salida de un PMT (con el balanceo negativo característico introducido por el filtro) y la señal corregida después del algoritmo BLR.



(a) Rojo - Señal de salida real; Verde - señal de salida reconstruida con el algoritmo



(b) Reconstrucción digital de base aplicada.

Figura 3.44: Señal de simulación de pulso de $50 \mu\text{s}$. 25865 pe. Noise 0,74 LSB

El residual estimado en la corrección de energía se ha calculado aplicando la deconvolución a las señales de Monte Carlo³ generadas usando la simulación detallada descrita anteriormente y el efecto se ha cuantificado siendo menor de 0,3 % FWHM para señales largas (correspondientes a grandes energías), y por lo tanto introduciendo un efecto más pequeño que la resolución debido al Fano factor.

3.5.2 Implementación del sistema de adquisición de datos.

En el sistema de adquisición de NEXT, los módulos DAQ basados en FPGA funcionan en modo *sampling*, almacenando datos continuamente en un búfer circular, mientras que el módulo de *trigger* del DAQ procesa los candidatos de activación recibidos, generando una señal de *trigger* que provoca la transferencia de dichos datos a una granja de PCs. NEXT ha adoptado el sistema de lectura escalable (SRS) en el núcleo de comunicación del DAQ. Dicho núcleo denominado ATCA (arquitectura de computación de telecomunicaciones avanzada). [Esteve y col. 2016] fue definido por la colaboración CERN RD51 como una plataforma de lectura escalable para múltiples tipos de canales.

Los distintos canales provenientes de los PMT y conectados a los módulos de datos del DAQ generan eventos candidatos de *trigger*, ya que cada uno de ellos, de forma individual, puede detectar la luz de centelleo primaria y/o secundaria producida en la cámara. La condición para generar un candidato de *trigger* se basa en la estimación de energía temprana de los eventos mediante umbral, y por lo tanto requiere una línea de base estable. Como consecuencia, la restauración de la línea de base de la señal debe implementarse *online*. El algoritmo empleado para la restauración es idéntico al presentado en la subsección 3.5.1 y que se muestra en figura 3.43, aunque en este caso se encuentra implementado de forma digital (DBLR). El bloque DBLR se activa cada vez que la señal de entrada supera un umbral referido a la línea de base inicial. Esta línea de base debe calcularse con una precisión elevada para que el umbral sea preciso. Para ello se ha utilizado un filtro de media móvil (MAU). La única diferencia entre la versión DBLR y la original BLR es que el mecanismo de control del acumulador para

³La simulación Montecarlo es una simulación de probabilidad múltiple, es una técnica matemática que se utiliza para estimar los posibles resultados de un suceso incierto.

su vaciado automático se realiza de forma lineal para simplificar los recursos lógicos empleados.

El algoritmo DBLR se ha implementado en una FPGA Xilinx Virtex-6 (XC6VLX240T-1ff1156). Hay un bloque DBLR por canal (12 canales PMT por módulo ATCA-FEC), y un filtro de limpieza inicial, ambos configurables. El algoritmo implementado y el filtro de limpieza emplean un formato de punto fijo de 42 bits (Q11.30). El formato ha sido seleccionado como un compromiso entre la estabilidad del algoritmo y los recursos físicos utilizados.

3.5.3 Resultados

Deconvolución de las formas de onda sin procesar de PMT en datos de calibración de ^{83m}Kr

NEXT-White ha estado operando en el LSC desde octubre de 2016 hasta enero de 2022. El detector ha sido calibrado con datos tomados con una fuente de ^{83}Rb conectada a su sistema de gas [Monrabal y col. 2018]. Este isótopo de rubidio decae a ^{83m}Kr a través de la captura de electrones con una vida de 86,2 días. El *Kriptón* luego decae al estado fundamental al emitir dos electrones de energía total ~ 40 keV, con una relación de ramificación del 95 %. Una descomposición de Kr da como resultado un depósito de energía lo suficientemente bajo para ser considerado como un punto.

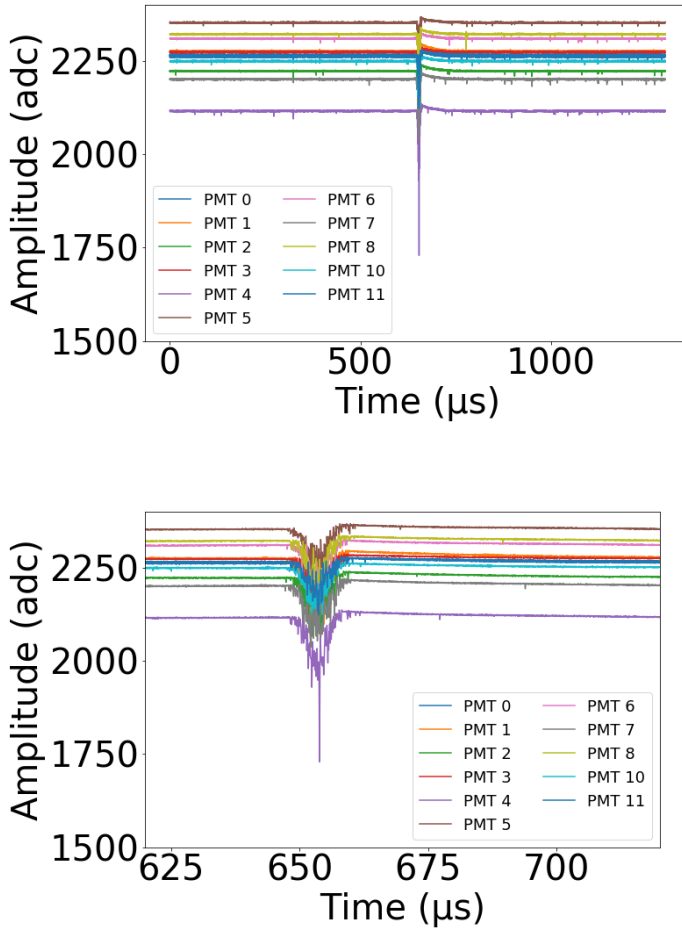


Figura 3.45: Formas de onda de ^{83m}Kr sin procesar para los PMTs individuales, mostrando la oscilación negativa introducido por la electrónica del front-end de los PMTs. La imagen superior muestra la forma de onda sin procesar en la ventana de adquisición de datos completa, mientras que la imagen inferior muestra un zoom en la señal amplificada por la EL (S_2) en la que se activó la lectura del evento.

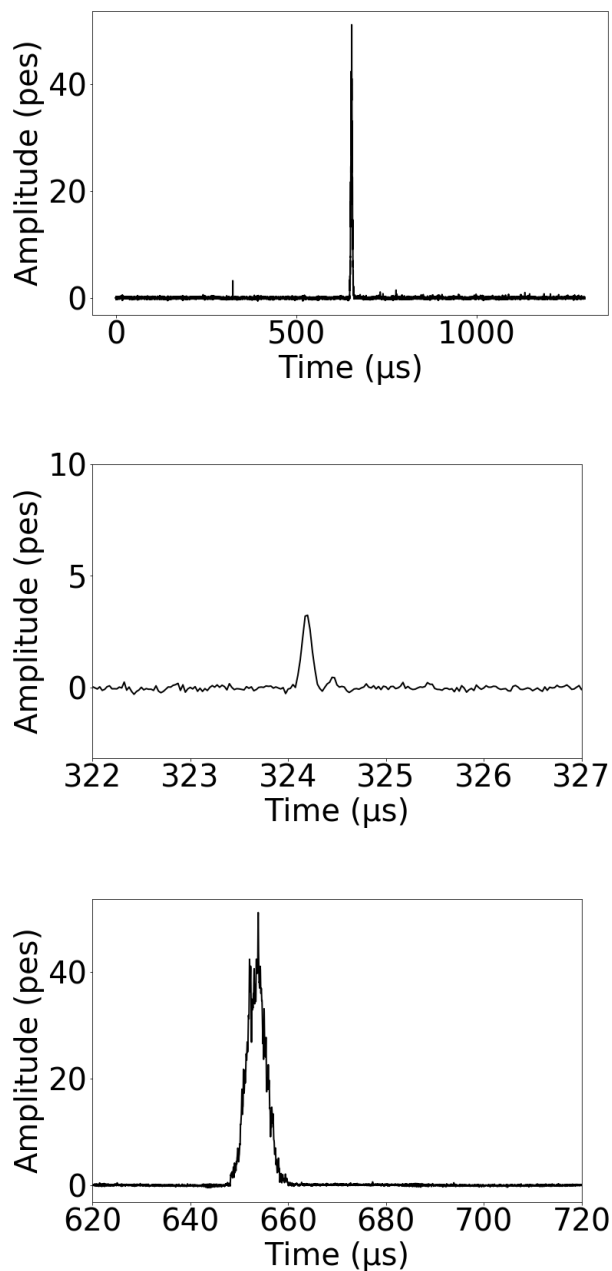


Figura 3.46: Formas de onda de ^{83m}Kr corregidas para la suma de los PMTs. La imagen superior muestra la forma de onda corregida en la ventana de adquisición de datos completa (S_1 y S_2), mientras que la imagen central muestra los zooms de la señal de centelleo principal (S_1) y la imagen inferior muestra las formas de onda de la señal amplificada por la EL (S_2).

Los datos sin procesar producidos por el plano de energía son formas de onda de PMTs, muestreadas cada 25 ns. El primer paso en el procesamiento de datos es aplicar el algoritmo BLR descrito anteriormente a las formas de onda en bruto, para producir formas con su línea de base reconstruida. Figura 3.45 muestra las formas de onda no procesadas correspondientes a los PMT del plano de energía, mientras que figura 3.46 muestra las formas de onda procesadas correspondientes a la suma de los PMTs. La condición de activación del evento está marcada en este caso por la señal amplificada por la EL (S_2) que aparece centrada en la ventana de adquisición de datos. La señal de centelleo inicial (S_1) aparece al principio de la ventana de adquisición de datos.

El procedimiento de deconvolución permite la recuperación total de la energía de las formas de onda. De hecho, la resolución de energía medida para depósitos de ^{83m}Kr de energía tipo punto en NEXT-White a 7,2 bar es $(4,55 \pm 0,01) \%$ FWHM en el volumen completo. Una simple extrapolación de $1/\sqrt{E}$ a $Q_{\beta\beta}$ produce $(0,592 \pm 0,001) \%$. La región fiducial está definida entre los límites ($r < 150 \text{ mm}, z < 150 \text{ mm}$). El corte radial garantiza una cobertura geométrica óptima y el corte z minimiza los errores residuales debidos a las fluctuaciones del desplazamiento de las cargas que aumentan con z . El ajuste produce $(3,88 \pm 0,04) \%$ extrapolando a $(0,504 \pm 0,005) \%$ en $Q_{\beta\beta}$. Este valor está razonablemente cerca de la mejor resolución esperada en NEXT-White lo que confirma las excelentes capacidades de la tecnología y las buenas condiciones de trabajo de la cámara [Martinez-Lema y col. 2018].

3.6 Diseño de las bases de polarización de los PMT

Debido al tamaño y complejidad del plano de energía, el diseño del circuito de la base debe ser lo más simple posible. Como consecuencia, la topología pasiva inicial se ha mantenido en un primer enfoque. Sin embargo, el tamaño y la cantidad de componentes deben estudiarse cuidadosamente para lograr una buena linealidad. También se ha identificado un importante compromiso entre la radiopureza y la linealidad.

El diseño se ha optimizado para preservar la linealidad en todo el rango dinámico de 0,1 fotones/ns a 1 fotones/ns para pulsos de luz más largos que 150 μ s. Esta es una característica crucial, en particular para medir la energía de los electrones de alta energía que dan como resultado largas trazas en el detector (y, por lo tanto, en señales tan largas como 150 μ s). Para hacer frente a la longitud de estas señales, el circuito de la base debe proporcionar una carga suficiente para el PMT con un cambio insignificante en la tensión entre dinodos para una corriente promedio máxima de 0,1 mA. Los cambios en estas tensiones introducen una ganancia variable en el tiempo que provoca una distorsión no lineal en el mecanismo de ganancia del PMT.

3.6.1 Requerimientos de diseño

Uno de los componentes electrónicos con más radioactividad son los condensadores que utilizan principalmente sustratos a base de cerámica. Por lo tanto, el objetivo principal de la propuesta se centrará en reducir el número y el tamaño de los condensadores a un mínimo que cumpla con la especificación de linealidad sin comprometer el nivel de radiopureza del plano de energía.

Los valores de la cadena de resistencias han sido elegidos basándonos en las recomendaciones del fabricante del PMT. El ratio entre las resistencias así como su valor final se ha ajustado según las restricciones térmicas. Los PMTs se mantienen a vacío, por lo que el circuito de la base debe disipar la potencia generada por los componentes electrónicos. Para ello se decidió recubrir el conjunto de la base con una resina epoxy radiopura con una alta capacidad de disipación térmica y un alto coeficiente dieléctrico.

Según los valores de resistencia elegidos, la potencia total disipada por la base de polarización es la siguiente:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{1230V^2}{35M\Omega} = 43mW \quad (3.49)$$

Una potencia total de ~ 40 mW en estas condiciones produce una temperatura estable de 30°C que no introduce alteraciones en el resto del detector. Las

simulaciones y test para demostrarlo serán explicados en las secciones 3.6.3 y 4.1.2.

El valor de los condensadores del diseño se calculó en función del algoritmo que se muestra en la figura 3.47. El objetivo principal es que la señal máxima en términos de fotones introduzca una caída de tensión por debajo del 0,1 % de la tensión entre los díodos. Dado que cada etapa aumenta la ganancia en un factor determinado (en función de la geometría y las características del PMT), los casos más desfavorables para esta caída de tensión se ubicarán en las últimas etapas donde la cantidad de carga que entregará el PMT es mayor. Por lo tanto, será necesario el respaldo un cierto número de estas etapas finales con condensadores que aporten la carga requerida.

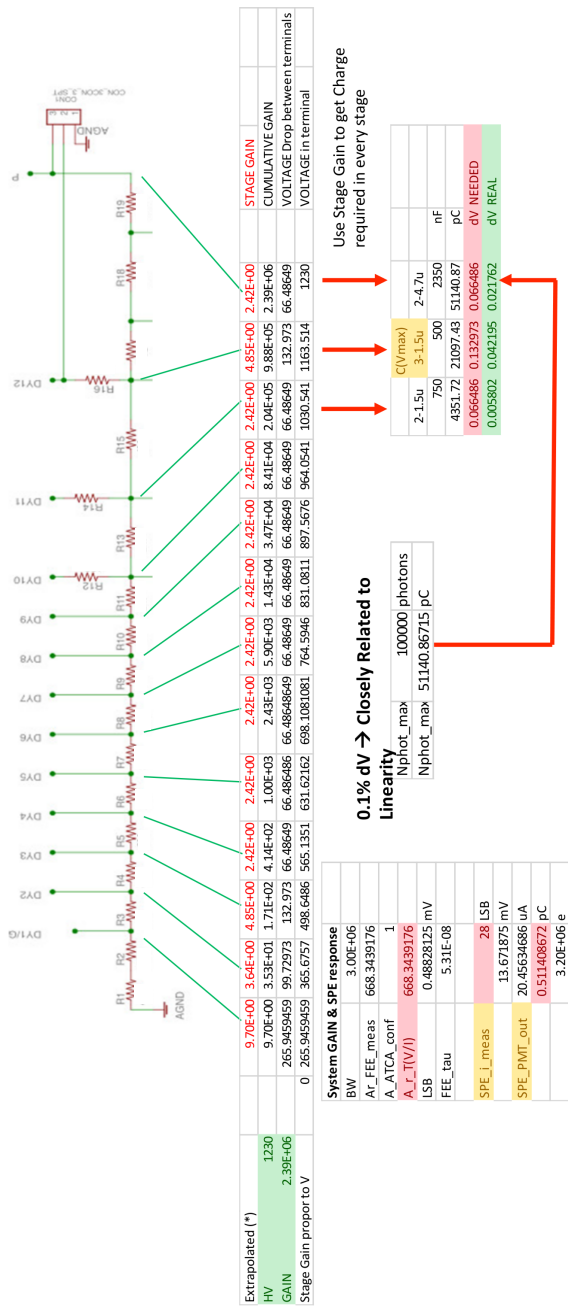


Figura 3.47: Esquema de la base. Procedimiento dimensionamiento de los condensadores

Para cumplir con los límites de radiopureza, se probó una primera propuesta basada en una cobertura mínima de 2 etapas. Para minimizar el aporte de radioactividad se escogieron condensadores polarizados de tántalo. Estos condensadores tienen una alta capacidad nominal y son los más radiopuros que se han encontrado en el mercado. Esta decisión fue basada en los datos de las bases de datos de radiopureza, además de las medidas realizadas en Canfranc por el personal del LSC con detectores de germanio, de diferentes tipos de condensadores.

Se utilizaron grupos de condensadores conectados en serie para resistir la alta tensión necesaria entre los dínodos, ya que los condensadores de tántalo de forma individual tienen un voltaje máximo más bajo que el necesario entre dínodos. Finalmente se testeó una combinación con 5 condensadores (2 en la última etapa y 3 en la penúltima) para soportar la alta tensión entre terminales (figura 3.52). En la sección 3.6.4 se muestran los resultados sobre linealidad en la figura 3.53.

3.6.2 Diseño

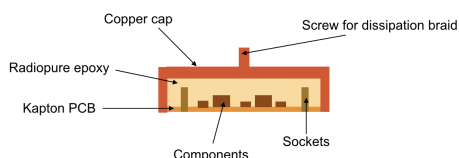
La base PMT es un circuito pasivo formado por 19 resistencias de diferentes valores, 7 condensadores de tántalo (3 con una capacidad de $1,5\mu\text{F}$ y 4 con $4,7\mu\text{F}$), 18 pines soldados en una tarjeta de circuito impreso de kapton recubierto con epoxy [*Araldite 2011. Epoxy adhesive in two components. s.f.*]. Este recubrimiento permite evitar la ruptura dieléctrica en vacío moderado o en una atmósfera de N_2 , y mejorar disipación térmica a través de la tapa de cobre (figura 3.49). Los parámetros críticos para el circuito base de PMT son la tensión de operación (1,23 kV) y la ganancia correspondiente ($2,5 \times 10^6$).

La tensión aplicada al PMT se ha establecido a través de un equilibrio entre la capacidad de detección de fotones individuales y el rango de alta tensión recomendado por el fabricante para una mejor linealidad. Para lograr una relación señal-ruido (SNR) suficiente, el ruido del FEE debe reducirse y esto limita su ganancia máxima. Por lo se requiere una ganancia en el PMT más elevada, ya que el ruido introducido por éste es menor. Se desarrolló un banco de pruebas a medida para mediciones de linealidad con el objeto de optimizar

el diseño de la base del PMT y testear los PMTs del plano de energía bajo las condiciones de operación de NEXT-White. Este banco de pruebas se describe en la sección 4.1.3.



(a) Base with the copper cap and filled of epoxy



(b) Scheme of the PMT base.

Figura 3.49: Base

Finalmente, la radioactividad del circuito de la base del PMT fue medida, siendo cuatro veces más grande que la del propio PMT. En la tabla 3.2 se muestra como referencia la actividad del ^{214}Bi de ambos elementos (consultar [Cebrián y col. 2017] para obtener una descripción detallada). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la radioactividad introducida en NEXT-White por la base está parcialmente protegida por el plato de cobre, y contribuye aproximadamente a la misma radioactividad de fondo (*background*) que los PMT.

Cuadro 3.2: Radioactive ^{214}Bi budget of NEXT-White PMTs and base circuits.

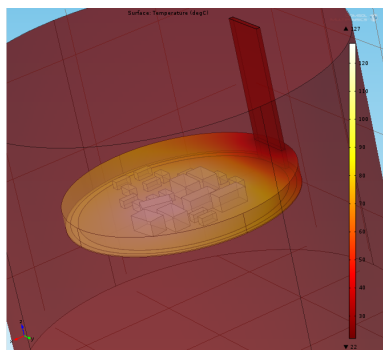
Componente	^{214}Bi actividad por unidad
PMT	0,35 mBq
Base	
Condensadores 1.5 uF	72 μBq
Condensadores 4.7 uF	123 μBq
Resistencias Finechem	4,1 μBq
Resistencias KOA RS	7,7 μBq
Pines	1,1 μBq
Araldite epoxy	1,4 mBq kg ⁻¹
cable Kapton-Cu	46,8 mBq kg ⁻¹
Sustrato de Kapton	23 μBq
tapa "cap" de cobre	12 μBq
Total base	1,2 mBq

3.6.3 Simulaciones térmicas

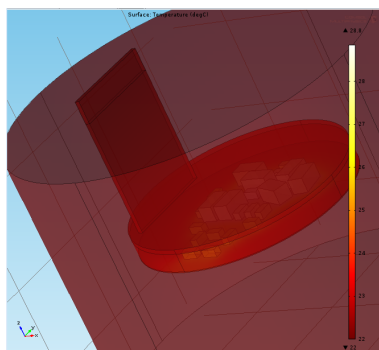
Tal y como se ha mencionado anteriormente, tanto los PMTs como las bases deben de poder trabajar en un vacío moderado, por lo que se debe asegurar una correcta conducción térmica hacia el exterior.

Se simuló la base con la cobertura de cobre (*cap*) y sin ella, para poder estimar la temperatura alcanzada por la base en las diferentes situaciones. En la figura 3.51a se puede ver una simulación de la base sin *cap*, en la que la disipación se realiza a través de una trenza de cobre desde la PCB. En la figura se observa que la temperatura alcanza los 120°C , siendo totalmente inviable su funcionamiento en estas condiciones figura 3.51.

Siendo necesaria por lo tanto la introducción del *cap* de cobre, se realizó una simulación (figura 3.51), donde una trenza de cobre sale del *cap* para su conexión con el plato soporte. La trenza de cobre se sujeta al centro del *cap* mediante una arandela y una tuerca de acero inoxidable sujeta a la varilla roscada que culmina el *cap* (figura 3.49). La simulación que incluye la distribución completa de materiales muestra una temperatura máxima de 28°C .



(a) Simulación térmica de la base sin *cap* de cobre en Comsol multiphysics (Vista general).



(b) Simulación térmica de la base con *cap* de cobre en Comsol multiphysics (Vista general).

Figura 3.51: Simulación térmica de la base en Comsol multiphysics.

3.6.4 Linealidad

La linealidad de los PMTs tiene un impacto decisivo en la resolución de energía, aunque es difícilmente evaluable, debido a la complejidad de la respuesta combinada de los sensores y el efecto de los procedimientos de calibración. Se va a asumir para el dimensionamiento de las bases de los PMTs que en el caso peor de una mayor densidad de fotones, la linealidad sea mejor del 0.5 % entendiendo que para señales con una menor densidad de fotones, las condiciones de linealidad serán mejores. Como primera aproximación, se considera la recomendación del fabricante de mantener los cambios de tensión en las distintas etapas por debajo de un 0.1 %. Dado que la última etapa es de donde se extrae la carga, se considera que el caso peor se produce allí y por lo tanto se realiza un primer dimensionamiento de los componentes para garantizar la anterior condición (ver figura 3.47). Este diseño inicial cubría las dos últimas etapas con condensadores, pero las mediciones de linealidad obtenidas en esta situación fueron peores de lo estimado, rozando el 2 % de error. Por lo tanto se realizó un rediseño ampliando a tres el número de etapas cubiertas con condensadores y aumentando su valor hasta mantener variaciones inferiores al 0.03 % en las tensiones de dichas etapas. En estas nuevas condiciones, el error de linealidad se mantuvo por debajo del 0.4 % (0,38 %) en todos los casos, siendo potencialmente mucho menor en condiciones reales de funcionamiento, cuando las densidades de fotones en el tiempo sean inferiores ([Alvarez y col. 2019]).

Aunque los gráficos que se muestran en la 3.53b tienen una respuesta bastante lineal, hay algunas longitudes de pulso que fallan en el ajuste. La señal de salida no muestra un efecto de sobrecarga típico que aparecería debido a una caída usual en el valor de ganancia para un alto número de fotones. Este comportamiento está relacionado con un mecanismo de distorsión que aparece debido a una redistribución de carga en los condensadores de la base. Cuando un condensador se agota, drena la carga del anterior. Cuando la carga drenada por el último condensador es demasiado alta, la caída de tensión en la etapa anterior afecta la ganancia general. La longitud del pulso de señal capaz de generar esta distorsión depende de las constantes de tiempo de cada etapa y

puede cambiar con la distribución de voltaje entre etapas. La linealidad medida fue 1.95 % para 100k pe.

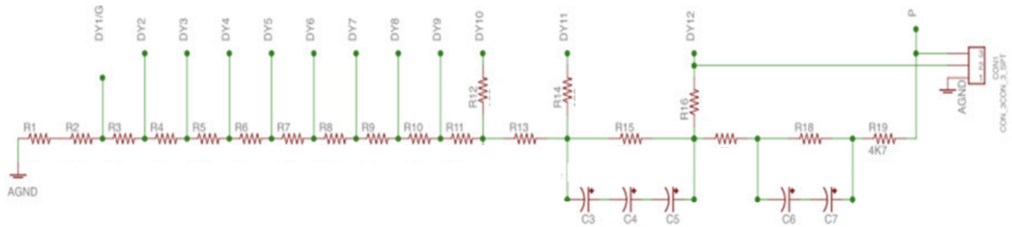


Figura 3.52: Esquema de una base de PMT con condensadores en las 2 últimas etapas.

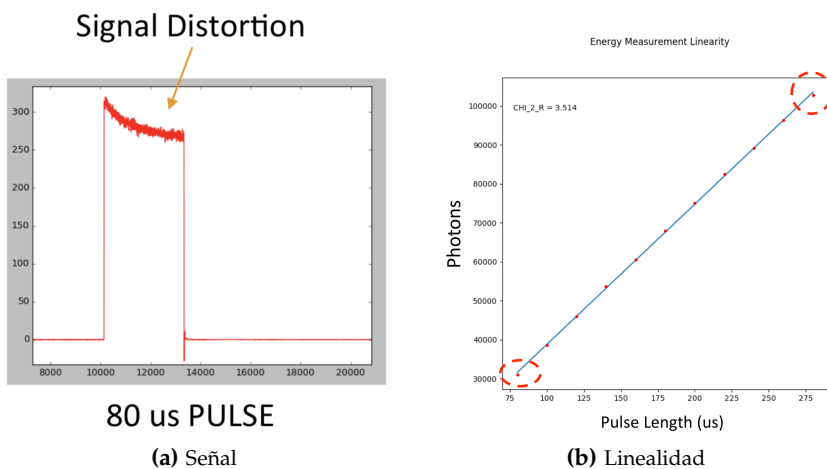


Figura 3.53: Base de PMT con condensadores en las 2 últimas etapas.

Observando los resultados, esto significa que se requiere una mejor cobertura de condensadores, por lo que se propuso una cobertura de 3 etapas (figura 3.54). Este circuito prácticamente no muestra distorsión en el tiempo. El ajuste de linealidad obtenido fue de 0.38 % para 140k foto-electrones(pe). Lo que excede los requisitos iniciales de linealidad figura 3.55. Los estudios completos de linealidad y el desarrollo del test se muestran en la sección 4.1.3.

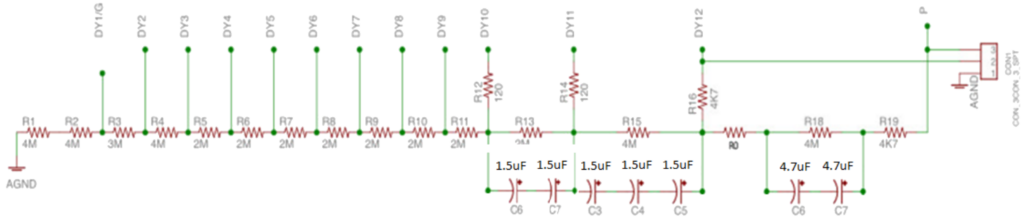


Figura 3.54: Esquema de una base de PMT con condensadores en las 3 últimas etapas

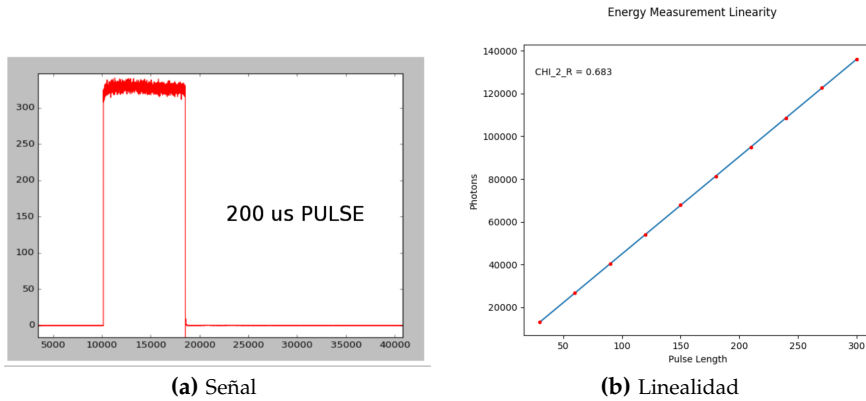


Figura 3.55: Base de PMT con condensadores en las 3 últimas etapas

3.6.5 Radiopureza

En lo referente a la radiopureza, lo más importante es tener el menor número de componentes, y que estos fueran lo menos radioactivos posibles. Una vez se decidió el diseño, se hizo una búsqueda de componentes dentro del mercado y de las bases de datos de radiopureza disponibles 4.2. Una vez que los componentes fueron seleccionados, todos los componentes que iban a ir en las bases de los PMTs fueron medidos en los detectores de germanio del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

"Nada en la vida es para ser temido, es solo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos"

– Marie Curie

4

Test de validación y Resultados finales

4.1 Tests

4.1.1 Test de alta tensión en las bases

El primer test funcional básico para comprobar el efecto de la alta tensión sobre el conjunto de la base de los PMTs, se realizó en el interior de una caja negra. Se conectó la cadena completa de elementos: base, cable de Kapton, y pasamuros de los que se emplearían después en la instalación definitiva de NEXT-White. Desde el pasamuros hasta el *FEE* se utilizó el mismo cable con la misma distancia de la instalación final. Desde la fuente de alta tensión hasta el *FEE* se utilizó un cable coaxial RG58 con conectores SHV en ambos extremos del cable (figura 4.1). En

un primer test no se conectó el *FEE* al sistema de adquisición para evitar posibles daños en el sistema de adquisición en caso de que fallara el funcionamiento de la base y se hubiera producido algún cortocircuito o un arco eléctrico.

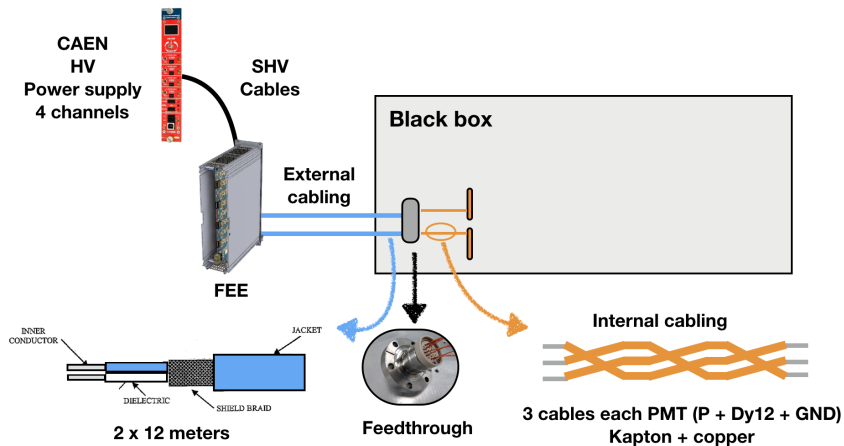


Figura 4.1: Banco de pruebas para los tests de alta tensión

Para esta primera parte del test se aplicaron a la base 1.700V, sabiendo que en su funcionamiento normal el PMT está a una tensión nominal de 1.230V (la tensión máxima que recomienda el fabricante para el PMT es 1.750V). Se aplicó un margen de un 35% para asegurar el correcto funcionamiento, sin riesgos en caso de tener que aplicar más tensión a la base para cambiar la ganancia del PMT. La fuente de alta tensión estuvo conectada en todo momento al *slow control* donde se monitorizaba y almacenaba la información de la tensión y la corriente. En caso de un consumo de corriente excesivo, que superara un umbral programado, la fuente se apagaba automáticamente la fuente de alta tensión para no dañar ninguna parte del sistema. Este test se realizó durante varios días comprobando que el consumo de corriente de la base era el correcto y no habían variaciones inesperadas de tensión ni corriente en ningún momento.

Tras superarse el primer test con éxito, se conectó el *FEE* al sistema de adquisición mediante un cable HDMI. De esta manera se pretendía observar si se producían micro-chispas que introdujeran cambios en las señales registradas. El objetivo era detectar si se producían pequeños impulsos, que no se tradujeran

en cambios de corriente apreciables, pero que pudieran asemejarse a las señales producidas por fotones individuales (Single photo-electro o SPE). Con este test se terminó de validar la base desde el punto de vista de la alta tensión.

4.1.2 Test térmicos

Para comprobar realmente la temperatura que alcanzaría la base se realizaron diferentes tests para comprobar la veracidad de las simulaciones realizadas en Comsol multiphysics (figura 4.2).

Los elementos utilizados para realizar el test fueron:

- Base (Circuito de Kapton®+ epoxy + *cap* de cobre)
- Sensor 1-wire®DS18B20 de Maxim [Maxim [s.f.\(b\)](#)]: Es un sensor digital de temperatura .
- Malla de cobre: Es para conectar el *cap* de cobre de la base con la vasija para disipar el calor.
- Vasija: Es una cámara cilíndrica de acero inoxidable AISI304L con tapas finales DN100CF y 300 mm de longitud.
- Pasamuros: 1 DN100CF de la compañía Allectra® para los conectores de la base y 1 DN40CF para el sensor de temperatura.
- RGA: Pfeiffer® PrismaPlus QMC220 M2 [Pfeiffer [s.f.\(b\)](#)]
- Bomba de vacío: Pfeiffer® HiCube [Pfeiffer [s.f.\(a\)](#)]
- Fuente de alimentación de alta tensión: Caen® N1470 [Caen [s.f.](#)]

El cable de alta tensión y el cable del sensor de temperatura se conectaron al pasamuros de la vasija. Para conseguir la conducción térmica se conectó el terminal de la base con el interior de la vasija mediante una malla de cobre. Una vez la vasija estuvo cerrada, se conectó a través de una conexión VCR la bomba de vacío y el espectrometro de masas (RGA). El siguiente paso consistió

en generar un vacío suficiente para asegurar la ausencia de chispas y de esa forma trabajar de manera segura con alta tensión. A continuación se realizó un test de fugas en la vasija empleando una bombona de gas Argón y el RGA. El Argón fue aplicado sobre las juntas con una pistola para comprobar con el RGA la ausencia de fugas.

En la imagen figura 4.2 se puede observar una cobertura de Teflón en la base. Se trata de una pieza de soporte que se decidió utilizar en la prueba para evitar de esa manera que la base tocara la vasija, lo que hubiera falseado la medida del test.



Figura 4.2: Vista del interior de la vasija donde se realizaron los test de temperatura de la base, antes de conectar el cable del sensor de temperatura y la trenza metálica.

Por otra parte, el sensor de temperatura estaba conectado a un PC a través de una tarjeta electrónica suministrada por el propio fabricante *DALLAS semiconductors* (figura 4.3a)([Maxim s.f.(a)]) junto a su correspondiente driver. Sobre el sensor de temperatura decir que utiliza el protocolo de comunicaciones 1-wire®. Este protocolo serie diseñado por la misma compañía está basado en un bus maestro y varios esclavos que se conectan a través de una sola línea de datos por la que además se alimenta el sensor.



(a) Controlador suministrado por la compañía Dallas semiconductors.



(b) Detalle del sensor de temperatura conectado a la base.

Figura 4.3: Sensor de temperatura 1-wire y su controlador

Una vez la vasija estuvo preparada, se suministró la tensión a la base con la fuente de alimentación y se verificó su funcionamiento y la temperatura durante 1 semana, obteniendo de media 26°C (figura 4.4). Consideramos por lo tanto validado el resultado de simulación obtenido anteriormente.

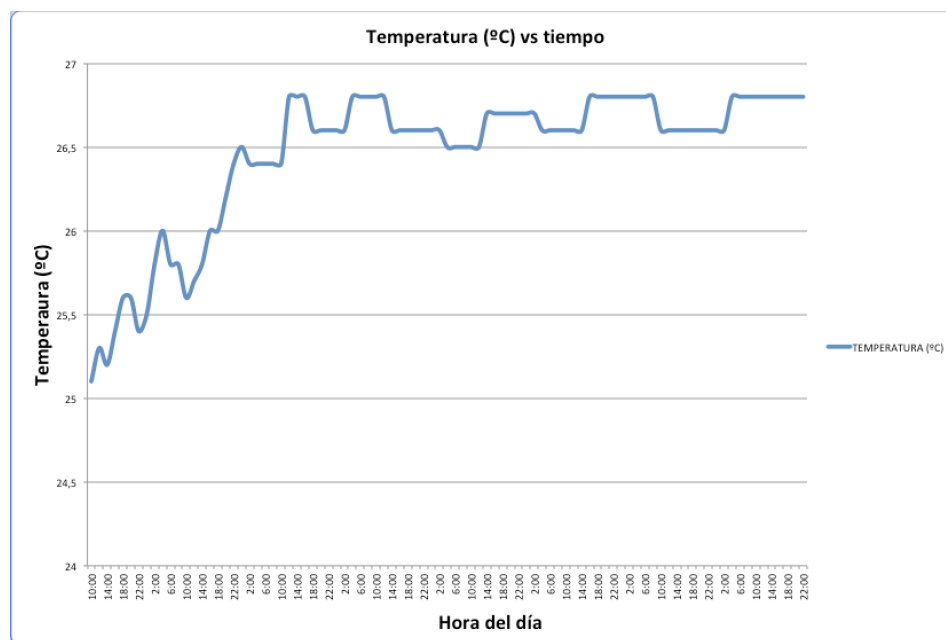


Figura 4.4: Gráfica con los datos del test.

4.1.3 Test de linealidad

Para el test de linealidad se completó el banco de pruebas que se utilizó para los test de tensión añadiendo un PMT y un LED. Dado que la cantidad de luz producida por el LED en condiciones de polarización estables era demasiado alta para una exposición directa al PMT, se utilizó un conjunto de filtros ópticos atenuadores con un factor del 90 % acoplados directamente al LED. Con el fin de reducir el efecto de las fluctuaciones del LED, cada medición se promedió con 200 muestras. Era importante emplear el sistema completo equivalente al que se tendría después en la instalación final para comprobar adecuadamente la linealidad. El rango dinámico de cada canal del plano de energía debía cubrir desde un solo fotón hasta 100×10^3 fotones. La duración de las señales esperadas es un factor muy importante en la linealidad, pudiendo hallarse pulsos de longitud desde pocos microsegundos hasta $150 \mu s$.

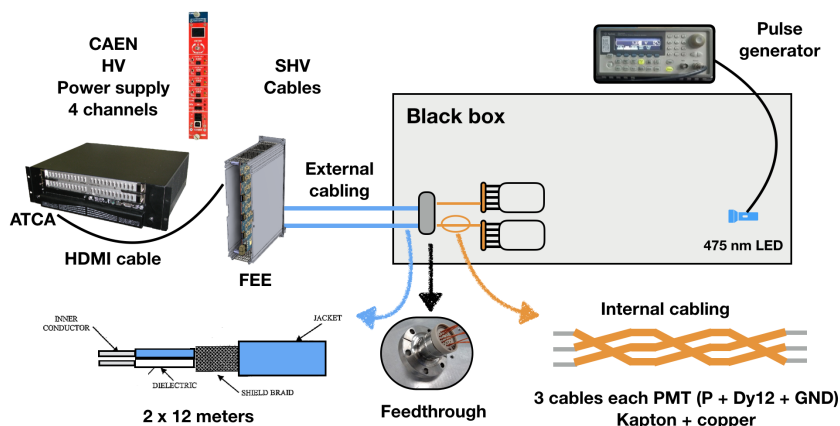


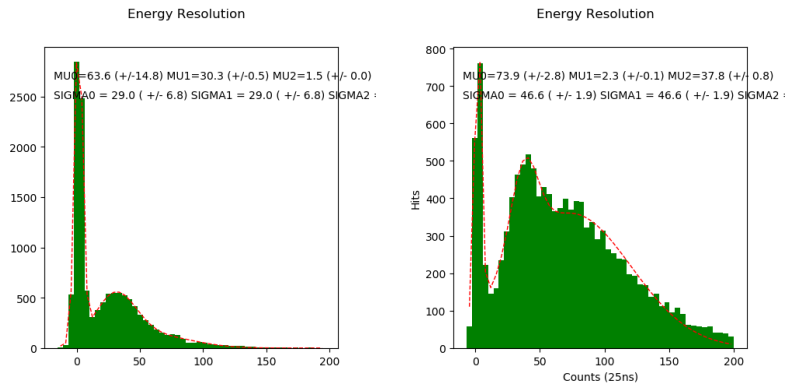
Figura 4.5: Visión general del banco de pruebas para mediciones de linealidad

El banco de pruebas de linealidad hace uso de un generador de señales que introduce un pulso cuadrado de tensión con tiempos de subida y bajada muy cortos en un LED de longitud de onda de 435 nm. El número de fotones generados es proporcional a la longitud del pulso. Se tomaron diferentes tandas de datos con la misma amplitud de pulso pero diferentes anchuras desde $1\ \mu\text{s}$ hasta $50\ \mu\text{s}$ en bloques de $5\ \mu\text{s}$ y desde $50\ \mu\text{s}$ hasta $300\ \mu\text{s}$ en bloques de $50\ \mu\text{s}$.

Con el fin de poder comprobar la linealidad de dos bases diferentes, con mismo diseño pero menor número de condensadores de desacoplo, se colocaron ambas bases en el mismo banco de pruebas. La primera contaba con 5 condensadores y la segunda con 7 condensadores (figura 4.5). En frente de los PMTs se situó un único LED para poder tomar datos a la vez y comparar los resultados. Esta prueba se realizó para averiguar el número mínimo de condensadores necesarios para asegurar linealidad en el rango de fotones que se esperaba tener y de esta forma aumentar la radiopureza del conjunto.

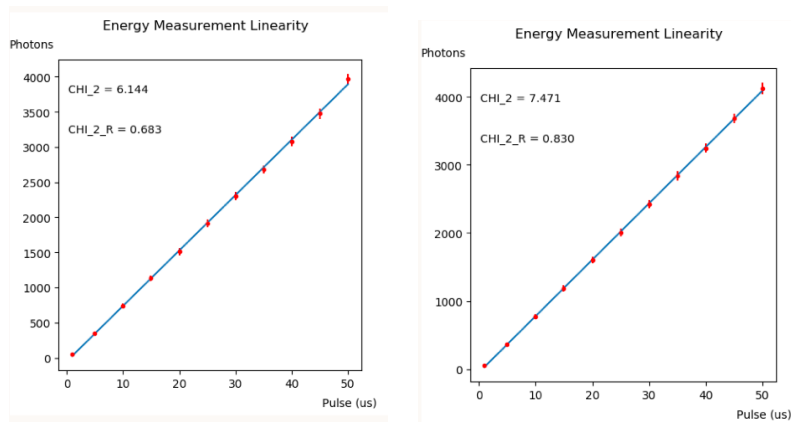
Con el fin de evaluar la linealidad, primero se obtuvo el valor de carga de un SPE en cada uno de los PMTs, ya que cada PMT, ante una misma tensión de alimentación, puede tener ganancia ligeramente superior o inferior. Para estos tests, primero se buscó con el osciloscopio la configuración mínima para poder

observar un SPE. En las figuras 4.6a y 4.6b se muestran los histogramas de donde se obtienen los valores de SPE para cada PMT.

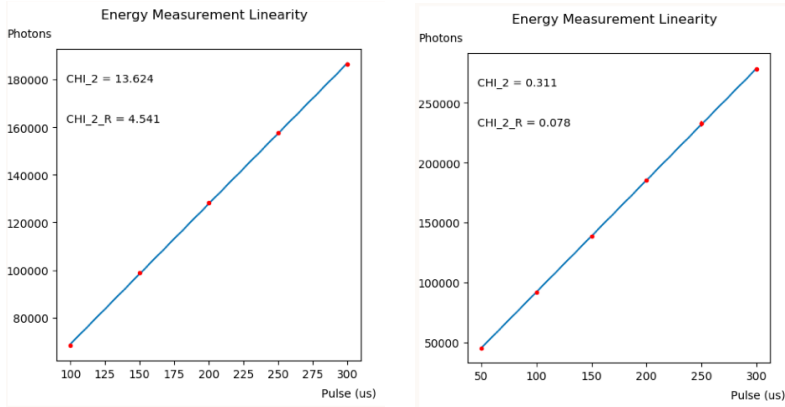


(a) Histograma de la base de 5 condensadores. SPE 30 cuentas (b) Histograma de la base de 7 condensadores. SPE 38 cuentas

Una vez conocido el valor del SPE se procedió a obtener las gráficas de linealidad. Se realizaron varias gráficas, una con valores de pulsos entre $1\mu s$ y $50\mu s$ y otra entre $50\mu s$ y $200\mu s$ o $300\mu s$ para representar aproximadamente la misma cantidad de fotones.



(a) Gráfica de linealidad de la base con 5 condensadores. $1\mu s$ a $50\mu s$ (b) Gráfica de linealidad de la base con 7 condensadores. $1\mu s$ a $50\mu s$



(a) Gráfica de linealidad de la base con 5 condensadores. $100\mu\text{s}$ a $300\mu\text{s}$ (b) Gráfica de linealidad de la base con 7 condensadores. $50\mu\text{s}$ a $300\mu\text{s}$

De las gráficas se puede extraer que para pocos fotones ambas bases son bastante lineales, pero si esperamos más de 160k fotones necesitamos la base de 7 condensadores.

Para concluir si la linealidad de la base era lo suficientemente buena nos basamos en los valores obtenidos para el χ^2 (chi cuadrado) y para el χ^2_{reducido} como se detalla a continuación:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\text{length}} \left(\frac{(Y - f(x))}{\sigma} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$\chi^2_{\text{reducido}} = \frac{\chi^2}{\text{length}(x) - 2} \quad (4.2)$$

Por ejemplo, para la figura 4.6a quedaría:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{11} \left(\frac{(Y - f(x))}{\sigma} \right)^2 = 6,144 \quad (4.3)$$

$$\chi^2_{\text{reducido}} = \frac{\chi^2}{11 - 2} = 0,683 \quad (4.4)$$

4.1.4 Test de chispas eléctricas en vacío (Efecto Paschen)

Dado que la electrónica de polarización debe trabajar en condiciones de vacío debemos tener en cuenta ley de Paschen que se describe como la relación entre la tensión aplicada, la distancia entre electrodos y la presión del gas en un espacio aislado. Según esta ley, a altas altitudes o en condiciones de baja presión, la tensión necesaria para la ruptura dieléctrica es menor. Esto significa que nuestras bases pueden experimentar fallos si no se tienen las condiciones idóneas para operar.

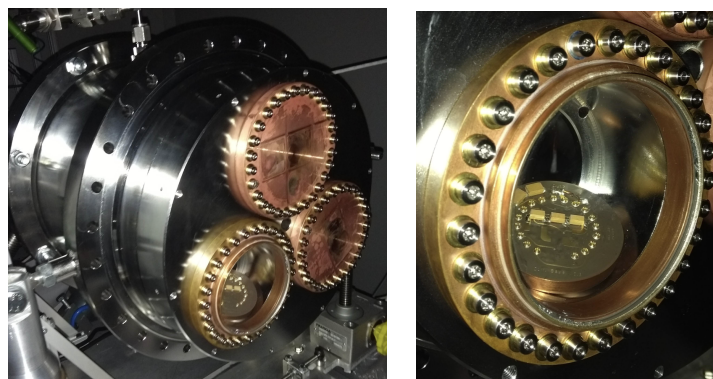
El objetivo de este test era conseguir averiguar el nivel mínimo de vacío necesario para que el sistema pudiera trabajar en un regimen estable sin sufrir cortocircuitos. El test se realizó teniendo control y monitorización continuo con 2 sensores de vacío a través del *slow control*.

Durante todo momento se grabó mediante una cámara de vídeo la base de polarización (figura 4.6) de manera que se pudiera detectar una posible chispa producida por un cortocircuito 4.7. Las lecturas de los dos sensores de vacío, uno en el propio plano de energía y otro en la bomba de vacío se monitorizaron constantemente mediante el *Slow control*. Este test se realizó en la sala semilimpia, donde se sitúa el detector NEXT-DEMO, con la luz apagada.

Con esta prueba se llegó a la conclusión de que el vacío mínimo necesario para trabajar en un rango seguro es $5,5 - 6 \times 10^{-3}$ mbar. Por tanto, los PMTs deben ser alimentados con alta tensión solo en el caso de haber 1 bar o un vacío mejor de $5,5 - 6 \times 10^{-3}$ mbar.

4.2 Radiopureza

El programa de selección de materiales del plano de energía del experimento NEXT se basa principalmente en espectrometría de rayos gamma de germanio utilizando detectores de fondo ultrabajo operados a una profundidad de 2450 metros equivalentes de agua (m.w.e.), del Servicio de Radiopureza del LSC. Al tratarse de una técnica no destructiva, se pueden analizar los propios componentes que se utilizarán en el experimento. Algunas mediciones



(a) Plano de energía de DEMO durante el test.

(b) Detalle de la ventana donde se puede ver la base durante el test.

Figura 4.6: Test de chispas y vacío.



Figura 4.7: Momento en que salta chispa en la base

complementarias se han realizado por GDMS, en la empresa Evans Analytical Group en Francia, proporcionando concentraciones de U, Th y K. El Servicio de Radiopureza del LSC ofrece varios detectores para medir niveles ultrabajos de radiactividad [Bandac y others. 2017]. Se trata de detectores de germanio de 2,2 kg de tipo p cerrado de alta pureza con criostatos de aluminio o cobre y eficiencias relativas¹ en el rango del 100 al 110%. La adquisición de datos se basa en módulos Canberra DSA 1000 y el blindaje consiste en un espesor

¹Eficiencia relativa a un detector NaI de 3"× 3" a 1332 keV y para una distancia de 25 cm entre la fuente y el detector.

de 5 a 10 cm de cobre en la parte interior rodeado de 20 cm de plomo de baja actividad, donde se inyecta constantemente gas nitrógeno para evitar la intrusión de radón. Las mediciones relacionadas con la lectura de energía se llevaron a cabo en el LSC utilizando diferentes detectores (denominados GeAnayet, GeAspe, GeLatuca, GeOroel, GeTobazo y Obelix). La eficiencia de detección necesaria para cuantificar las actividades se estimó mediante simulaciones Monte Carlo para cada muestra, teniendo en cuenta la eficiencia intrínseca, el factor geométrico y la autodetección. La incertidumbbre en esta eficiencia se estima en un 10 % y se incluye en el cálculo de la incertidumbre de las actividades derivadas. Actividades de diferentes subseries en las cadenas naturales de ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U así como así como de radionucleidos comunes primordiales, cosmogénicos o antropogénicos como ^{40}K , ^{60}Co y ^{137}Cs . se han evaluado analizando las líneas gamma más intensas de los distintos isótopos; las actividades se han cuantificado cuando ha sido posible y, en caso contrario, se han obtenido límites superiores.[Cebrián y col. [2017](#)].

En la Tabla de la figura [4.8](#) se resumen las medidas realizadas para las muestras analizadas, indicando el material y el proveedor, el detector utilizado, el tamaño de la muestra y el tiempo en vivo de toma de datos. Todas las muestras se limpiaron en un baño de ultrasonidos con alcohol puro antes de iniciar la medida, a menos que esto pudiera dañar el componente.

Component, Supplier	# in table 2	Detector	Sample size	Time (d)
PMT R11410-10, Hamamatsu	1	GeAnayet	1 unit	33.7
PMT R11410-10, Hamamatsu	2	GeAnayet	3 units×18 runs	
Capacitors 1.5 μ F, AVX	3	GeLatuca	392 units (0.16 g/unit)	37.8
Capacitors 4.7 μ F, AVX	4	GeAnayet	156 units (0.33 g/unit)	28.0
Polypropylene capacitors, Vishay	5	GeAspe	46 units (8 g/unit)	22.5
Resistors, Finechem	6	GeLatuca	1200 units (8.8 mg/unit)	38.5
Resistors, KOA RS	7	GeTobazo	100 units (16.2 mg/unit)	32.2
Resistors, Mouser	8	Obelix	100 units (9 mg/unit)	54.1
Pin receptacles, Mill Max	9	GeLatuca	1535 units (51 mg/unit)	31.9
Thermal epoxy, Electrolube	10	GeLatuca	706 g	40.4
Epoxy 2011, Araldite	11	GeLatuca	1712 g	29.6
Solder paste, Multicore	12	GeLatuca	457 g	44.3
Kapton-Cu cable, Allectra	13	GeAspe	352 g	12.2
Cuflon, Polyflon	14	GeOroel	1876 g	24.3
Kapton substrate, Flexible Circuit	15	GeAnayet	50 units (0.61 g/unit)	54.7
Windows, Precision Sapphire Technologies	16	GeAnayet	527 g	44.9
Optical gel, Nye Lubricants	17	GeAnayet	53.5 g	58.3
TPB, Sigma Aldrich	18	GeAnayet	4.1 g	38.3
PEDOT:PSS, Aldrich Chemistry	19	GeAspe	115 ml	77.1
M4 screws (manual cleaning)	23	GeLatuca	40 units (2.4 g/unit)	30.3
M4 screws (Alconox cleaning)	24	GeLatuca	267 units (2.4 g/unit)	56.6
Vacuum grease, Apiezon M	25	GeAspe	85.4 g	44.4
Copper CuAl, Lugand Aciers	26	GeOroel	94 kg	68.6
CuSn braid, RS	29	GeAspe	1875 g	38.2

Figura 4.8: Información sobre las mediciones realizadas con los detectores de germanio del Servicio de Radiopureza del LSC componente y proveedor, detector utilizado, tamaño de la muestra (masa o número de unidades) y tiempo de detección tiempo de actividad.[Cebrián y col. 2017]

#	Component	Technique	Unit	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	²²⁸ Th	²³⁵ U	⁴⁰ K	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs
1	PMT	Ge	mBq/PMT	<187	<1.8	<5.4	<3.4	<1.6	<29	2.82±0.27	<0.6
2	PMT	Ge	mBq/PMT	<69	0.35±0.08	<2.1	0.53±0.12	0.43±0.11	12.1±1.6	3.80±0.27	<0.3
3	Capacitors 1.5 µF, AVX	Ge	µBq/unit	<360	72±3	49±3	38±2	<1	71±9	<1	<1
4	Capacitors 4.7 µF, AVX	Ge	µBq/unit	<900	123±7	95±7	86±6		123±21	<3	<2
5	Capacitors Vishay	Ge	mBq/unit	10.4±2.7	5.29±0.25	8.52±0.51	8.75±0.49		5.29±0.57	<0.036	<0.043
6	Resistors Finchem	Ge	µBq/unit	85±23	4.1±0.3	5.6±0.5	4.4±0.3		83.6±8.7	<0.2	104±11
7	Resistors KOA RS	Ge	µBq/unit	<852	<7.7	<14	<4.1	<3.5	<29	<2.1	<1.5
8	Resistors Mouser	Ge	µBq/unit	<182	<7.0	5.3±1.5	<8.0	3.7±1.1	<37	<1.7	<1.8
9	Pin receptacles	Ge	µBq/unit	217±42	<1.1	5.6±0.5	4.5±0.4	6.1±0.5	20.5±2.4	<0.3	<0.2
10	Thermal epoxy	Ge	mBq/kg	(1.0±0.2)10 ³	169.4±7.9	52.1±3.7	54.4±3.2		105±12	<1.1	<1.3
11	Epoxy Araldite	Ge	mBq/kg	<182	<1.4	<3.7	<2.5	<0.8	15.0±2.4	<0.4	<0.4
12	Solder paste	Ge	mBq/kg	<310	<2.7	<4.7	<2.5	<5.2	<13	<1.0	<1.6
13	Kapton-Cu cable	Ge	mBq/kg	<1.1×10 ³	46.8±3.3	<40	<32	<5.2	166±27	<5.2	<4.4
14	Curlon	Ge	mBq/kg	<33	<1.3	<1.1	<1.1	<0.6	4.8±1.1	<0.3	<0.3
15	Kapton substrate	Ge	µBq/unit	<2.8×10 ³	<23	77±13	43.9±7.2	<18	<216	<6.4	<6.7
16	Sapphire windows	Ge	mBq/kg	<275	<2.7	<7.6	<5.5	<2.1	<18	<0.7	<1.0
17	Optical gel	Ge	mBq/kg	<1.7×10 ³	<22	<49	<18	<16	<173	<4.5	<5.8
18	TPB	Ge	Bq/kg	<23	<0.17	<0.57	<0.15	<0.11	<1.7	<0.05	<0.05
19	PEDOT:PSS	Ge	µBq/ml	<626	<6.9	<23	<4.8	<3.9	49±11	<1.7	<1.8
20	Brazing paste	GDMS	µBq/kg	55±10		49±4			<31		
21	Brass bolts	GDMS	µBq/kg	8.9±0.7		6.9±0.2			<31		
22	SS screws	GDMS	mBq/kg	3.25±0.25		0.57±0.08			<0.19		
23	M4 screws, manual clean	Ge	µBq/unit	<2.2×10 ³	<21	<60	20.0±4.6	<12	<93	14.0±1.8	<6.0
24	M4 screws, Alconox clean	Ge	µBq/unit	<616	<8.6	14.9±3.4	17.4±1.8	3.7±1.0	<19	13.4±1.1	<1.4
25	Vacuum grease	Ge	mBq/kg	<1.0×10 ³	<10	<43	<8.5	<6.1	<49	<3.5	<2.9
26	CuAl	Ge	mBq/kg	<4.1	<0.16	<0.15	<0.13	<0.17	<0.37	0.04±0.01	<0.04
27	CuAl	GDMS	µBq/kg	<12		<4.1			62		
28	CuCl	GDMS	µBq/kg	25±5		15±4			190		
29	CuSn braid	Ge	mBq/kg	<168	<2.4	<7.1	<2.1	<1.8	<14	<0.6	<0.5

Figura 4.9: Actividades medidas para los componentes de lectura de energía utilizados en NEXT. Los resultados comunicados para ²³⁸U y ²³²Th corresponden a la parte superior de las cadenas y los de ²²⁶Ra y ²²⁸Th dan actividades de las partes inferiores.[Cebrián y col. 2017]

4.2.1 Radiopureza de las bases de los PMTs

Cada base de los PMT de NEW se compone de un total de 19 resistencias de distinta resistencia eléctrica, 7 condensadores (5 con una capacitancia de $1,5 \mu\text{F}$ y 2 con $4,7 \mu\text{F}$) y 18 pines soldados sobre un sustrato de kapton, un tapón de cobre con una masa de $\sim 50 \text{ g}$ y un cable de 1 m de longitud de kapton y cobre relleno con epoxy. Para la soldadura se utilizó una pasta de estaño. Todos estos componentes utilizados en las bases de los PMT fueron medidos por separado. Los condensadores de la base son condensadores electrolíticos sólidos de tántalo con electrodo de polímero conductor, serie TCJ, suministrados por el fabricante AVX [AVX s.f.]. Se han medido dos muestras de unidades de diferente capacitancia, diferente tamaño y masa. Fue posible cuantificar las actividades del ^{40}K , ^{232}Th y la parte inferior de la cadena del ^{238}U (filas 3 y 4 de la tabla de la figura 4.9). Las actividades medidas en los condensadores más grandes son aproximadamente un factor 2 más altas que en las más pequeñas, que es también la relación entre las masas de cada unidad. La presencia de ^{182}Ta (emisor beta con $Q=1814,3 \text{ keV}$, $T_{1/2}=114,6 \text{ días}$, producido por activación del neutron en ^{181}Ta) se identificó mediante varias de sus emisiones gamma. Además, se identificó una muestra de condensadores de la compañía Vishay (condensadores de película de polipropileno metalizado, $5 \mu\text{F}$, $32 \times 11 \times 21 \text{ mm}^3$ cada unidad). Todos los radioisótopos comunes se cuantificaron con actividades de unos pocos mBq/unidad (fila n° 5 de la figura 4.9), que son inaceptables para NEXT, por lo que se desecharon estos condensadores de polipropileno.

Se han examinado las resistencias SMD que se utilizarán en el divisor de tensión de varios proveedores:

- Las resistencias SM2 suministradas por la empresa japonesa Finechem tienen un sustrato cerámico de alúmina. Las dimensiones de cada unidad son $3,2 \times 1,6 \times 0,55 \text{ mm}^3$. Las actividades se han derivado para el ^{40}K , así como para las cadenas ^{232}Th y ^{238}U (fila n° 6 de la figura 4.9). Además, las resistencias mostraron importantes actividades de ^{134}Cs y ^{137}Cs , que podrían estar relacionadas con el accidente de Fukushima. Para el ^{134}Cs (emisor beta con $Q=2058,98 \text{ keV}$, $T_{1/2}=2,06 \text{ y}$), la actividad fue de $32,7 \pm 1,6 \mu\text{Bq/unidad}$. Los resultados obtenidos pueden compararse con los de las

resistencias SM5D Finechem que no muestran actividad de Cs, presentados en [Álvarez y col. 2012c] , [Aprile y col. 2011a]; los resultados son más o menos coherentes teniendo en cuenta que el volumen de SM5D de Finechem es cuatro veces mayor que el de las resistencias SM2.

- Otra muestra consistió en resistencias producidas por KOA Speer y suministradas por RS (Thin Film 1206, 62Ω). Las dimensiones de cada unidad son $3,2 \times 1,6 \times mm^3$. No se ha cuantificado ninguno de los radioisótopos comunes y se han fijado límites superiores a sus actividades (fila nº 7 de la figura 4.9)

Comparando los resultados de las resistencias consideradas, se puede concluir que las actividades cuantificadas o límites superiores se sitúan en niveles similares de unos pocos μBq /unidad para todas ellas; finalmente, se han seleccionado 14 unidades de Finechem y 5 de RS.

Se examinaron los pines de Mill Max (modelo 0327-0-15-15-34-27-10-0) con carcasa de una aleación de latón 360. Se han cuantificado las actividades de la mayoría de los radioisótopos comunes (fila nº 9 de la figura 4.9).

La epoxy fabricada por Electrolube (división de HK WENTWORTH LTD) para disipar el calor en las bases de los PMT también fue medida. Para preparar la muestra, la epoxy (EER2074A) y el endurecedor correspondiente (EER2074B) se mezclaron dentro de un recipiente limpio siguiendo las especificaciones. También se tamizó una muestra del epoxi Araldite 2011. Se mezcló Araldite2011-A (resina) y Araldite 2011-B (endurecedor). Como se muestra en las filas 10-11 de la figura 4.9, el epoxy Araldite mostró una mejor radiopureza, ya que solo se cuantificó el ^{40}K y los límites superiores para los otros radioisótopos comunes; estos son más estrictos que los disponibles en [38]. Por lo tanto, el epoxy Araldite 2011 se utilizó finalmente en las bases PMT.

Se analizó una muestra de pasta de soldadura SnAgCu sin plomo suministrada por Multicore (ref. 698840) y los resultados se presentan en la fila 12 de la figura 4.9. ^{108m}Ag , inducido por interacciones de neutrones y que tiene una vida media de $T_{1/2}=438$ y, ha sido identificado en la pasta, con una actividad de $(5,26 \pm$

0,40) mBq/kg, mientras que se han establecido límites superiores de unos pocos mBq/kg para los isótopos radiactivos comunes.

Se examinó un rollo de cable de kapton-cobre suministrado por la empresa Allectra. Se cuantificaron las actividades de algunos isótopos (fila nº 13 de la figura 4.9) y, además, la presencia de ^{108m}Ag puede ser a través de la identificación de sus líneas gamma más intensas.

En cuanto al sustrato base, se han considerado el cuflon y el kapton. El cuflon ofrece bajos niveles de actividad, como se mostró en las mediciones de muestras utilizando tanto ICPMS como espectroscopia gamma Ge. Como se presenta en [Álvarez y col. 2012c], una medición de Polyflon cuflon hecho de una capa de PTFE de 3,18 mm de espesor intercalada por dos láminas de cobre de $35\text{ }\mu\text{m}$ de espesor, los resultados se muestran en la fila 14 de la figura 4.9. Sólo la actividad de ^{40}K se detectó. Aunque también se podría haber utilizado cuflón, finalmente se seleccionó kapton y una muestra de los sustratos base de 0,5 mm de espesor producidos por Flexible Circuit. Los límites superiores se establecieron para todos los radioisótopos comunes excepto para el ^{232}Th (fila 15 de la figura 4.9).

"La ciencia, muchacho, está hecha de errores, pero de errores útiles de cometer, pues poco a poco, conducen a la verdad"

– Julio Verne

5

Resultados de energía en NEW

5.1 Primeros resultados sobre la resolución de energía del detector NEXT-White (NEW).

Los primeros resultados de las medidas de la resolución energética fueron publicados en [Renner y col. 2018]. A continuación se muestra un extracto de dicho artículo para justificar las mejoras obtenidas en el desarrollo de la electrónica.

Las primera medidas fueron utilizado fuentes de calibración de ^{137}Cs y ^{232}Th a una presión de 7,2 bar, durante la última parte del llamado Run II, que se extendió hasta otoño de 2017. Estas fuentes proporcionan eventos monoenergéticos a mayores energías y por lo tanto ofrecen pruebas estrictas

Cuadro 5.1: Parámetros de operacion en NEW

Parámetros	Valor
Presión	7.2 bar
E/p	$1,7kVcm^{-1}bar^{-1}$
Drift field	$400Vm^{-1}$
V_{ctodo}	-28 kV
V_{puerta}	-7.0 kV
Largo	664.5 mm
Diámetro	454 mm
EL gap	6 mm
Drift length	$(530,3 \pm 2,0)mm$
Masa fiducial	2.3 kg

de la reconstrucción de la energía en las condiciones similares a las señales de desintegración doble beta esperadas.

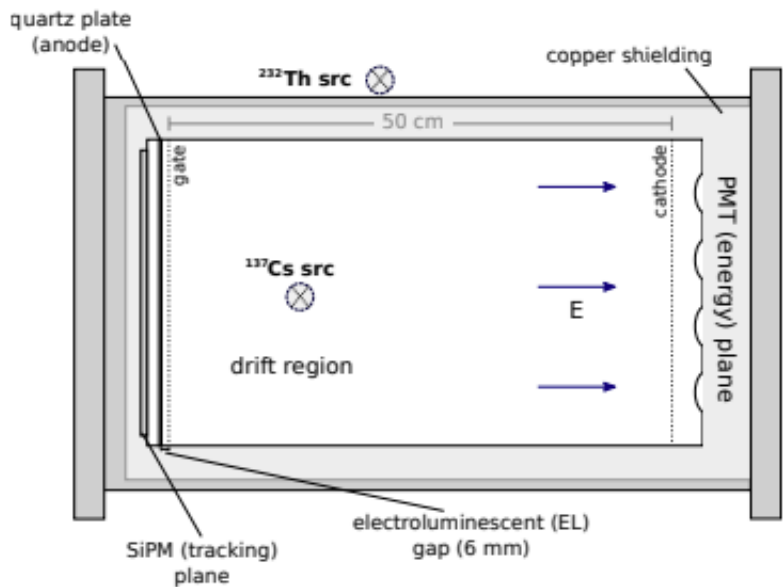


Figura 5.1: Esquema del detector con la configuración de fuentes radioactivas en este estudio. La fuente de ^{137}Cs esta situada en un puerto lateral de la vasija, mientras que la fuente de ^{232}Th está situada encima de la vasija.[Renner y col. 2018]

Se han llevado a cabo estudios de linealidad y resolución en energía del detector NEW a alta energías utilizando tomas de datos (*runs*) dedicados donde las fuentes radiactivas externas fueron empleadas como fuente de deposiciones de energía monoenergética, aunque espacialmente separadas. Se emplearon dos fuentes simultáneamente para este propósito: ^{137}Cs y ^{232}Th . La fuente de ^{137}Cs se colocó en el puerto lateral de la vasija a presión, y la fuente ^{232}Th se colocó en la parte superior de la vasija como se ilustra en la figura 5.1.

Estas fuentes proporcionan dos líneas de calibración bien definidas: el ^{137}Cs se desintegra emitiendo un rayo gamma con energía de 661,6 keV y el ^{232}Th decae eventualmente a ^{208}Tl que emite un rayo gamma con una energía de 2615 keV. La adquisición de datos fue activada por una señal S_2 en dos PMT integrando en un intervalo de 10-250 μs cuando ésta excede un umbral de activación especificado. El umbral de activación fue seleccionado para garantizar una eficiencia de detección completa para el ^{137}Cs y deposiciones de mayor energía.

5.1.1 Selección y reconstrucción de eventos

Estos resultados se enfocan en eventos producidos en la región del foto-pico de ^{137}Cs (661 keV) y en la región del pico de “doble escape” de ^{208}Tl (1592,5 keV).

Las interacciones de la radiación ionizante con xenón pueden ocasionalmente expulsar electrones de las capas internas de los átomos. Las subsiguientes transiciones de electrones a estas capas inferiores conducen a la emisión de rayos X característicos, varios de los cuales tienen energías cercanas a los 30 keV. Algunos de estos rayos X pueden viajar una distancia significativa de la traza de ionización principal antes de interactuar, o incluso escapar completamente el detector. Los rayos X que interactúan proporcionan una fuente adicional de energía casi monoenergética que se pueden utilizar para la calibración.

Las características de los eventos se calcularon a partir de las formas de onda de los PMT y SiPM adquiridas. Las señales S_1 y S_2 se identificaron como picos en la forma de onda de la suma de los PMTs (muestreadas en intervalos de 25 ns) en función de su ubicación y duración en el tiempo (ver [Martinez-Lema y col.

2018] para más detalles). Eventos con exactamente un pico S_1 y al menos uno pero no más de tres picos de S_2 se aceptaron para análisis posteriores.

5.1.2 Medida de energía

La forma de onda de las señales PMT sumadas se integró en intervalos de $2 \mu s$ correspondientes al tiempo de tránsito de un electrón a través de la *EL gap*. El patrón de las señales SiPM observadas en cada uno de los segmentos de tiempo fue utilizado para determinar el número y las posiciones (x , y) de las deposiciones de energía separadas, o *Clusters*, presentes en el intervalo de tiempo dado. Si se reconstruyera más de un *cluster* en un determinado intervalo de tiempo, la energía detectada por los PMT se distribuiría proporcionalmente entre los *clusters* según sus cargas, según lo determinado por las señales SiPM. Las coordenadas espaciales (x , y , z) de cada *cluster* se utilizaron para determinar el factor de corrección de energía necesario por la falta de uniformidad de la respuesta en (x , y) y el tiempo de vida del electrón¹.

La energía total del evento se define como la suma de las energías de todos los *clusters* reconstruidos en el evento. La distribución de energía resultante de los eventos reconstruidos en el volumen fiduciario completo se muestra en la Figura 5.2. El volumen fiduciario completo incluye la mayor parte del volumen activo del detector y se define como $50 \text{ mm} < Z_{min} , Z_{max} < 500 \text{ mm}$ y $R_{max} < 180 \text{ mm}$ donde Z_{min} y Z_{max} son las coordenadas z mínima y máxima, y R_{max} es la coordenada radial máxima de todos los *clusters* reconstruidos en un evento dado. Son visibles varios picos que serán analizados en más detalle más adelante, incluidos el fotopico ^{137}Cs y el pico de doble escape $^{208}\text{Tl } e^+e^-$.

¹Distancia recorrida por el electrón dentro de la cámara antes de ser absorbida por átomos remanentes en el gas xenón.

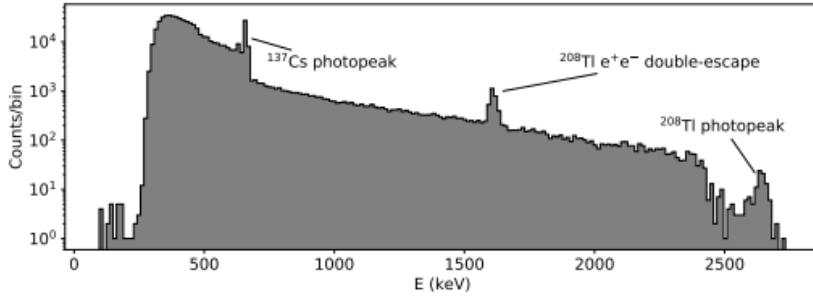


Figura 5.2: Distribución de energía de los eventos registrados en la región fiduciaria completa. El ^{137}Cs (~662 keV) y los fotopicos ^{208}Tl (~2,6 MeV) son visibles junto con sus espectros de Compton. Un pico también es visible a ~1,6 MeV debido a la producción de pares e^+e^- a partir de la gamma de 2,6 MeV y el escape de ambas gammas 511 keV producidas en la posible aniquilación de positrones.

5.1.3 Distribución espacial de eventos y cortes fiduciales restringidos

La Figura 5.2 indica la presencia de las líneas de calibración de interés, aunque con *background* significativo. La pureza de la muestra de calibración se puede mejorar aprovechando la localización espacial de las muestras de la fuente principal. Como se muestra en la Figura 5.3, la mayoría de los eventos en las líneas monoenergéticas están ubicadas cerca de las posiciones de origen. Para mejorar la relación señal-ruido de la muestra de calibración, se aplica un corte fiducial, $160 \text{ mm} < Z_{\min} , Z_{\max} < 300 \text{ mm}$, en el análisis posterior.

La respuesta del detector se degrada significativamente en los radios exteriores del volumen activo debido a recolección de luz imperfecta por parte de los PMT [Martinez-Lema y col. 2018], lo que contribuye significativamente a la degradación de la resolución energética. Para eliminar el sesgo inducido por los eventos que se acercan a los bordes del detector se aplica el corte fiducial $R_{\max} < 150 \text{ mm}$.

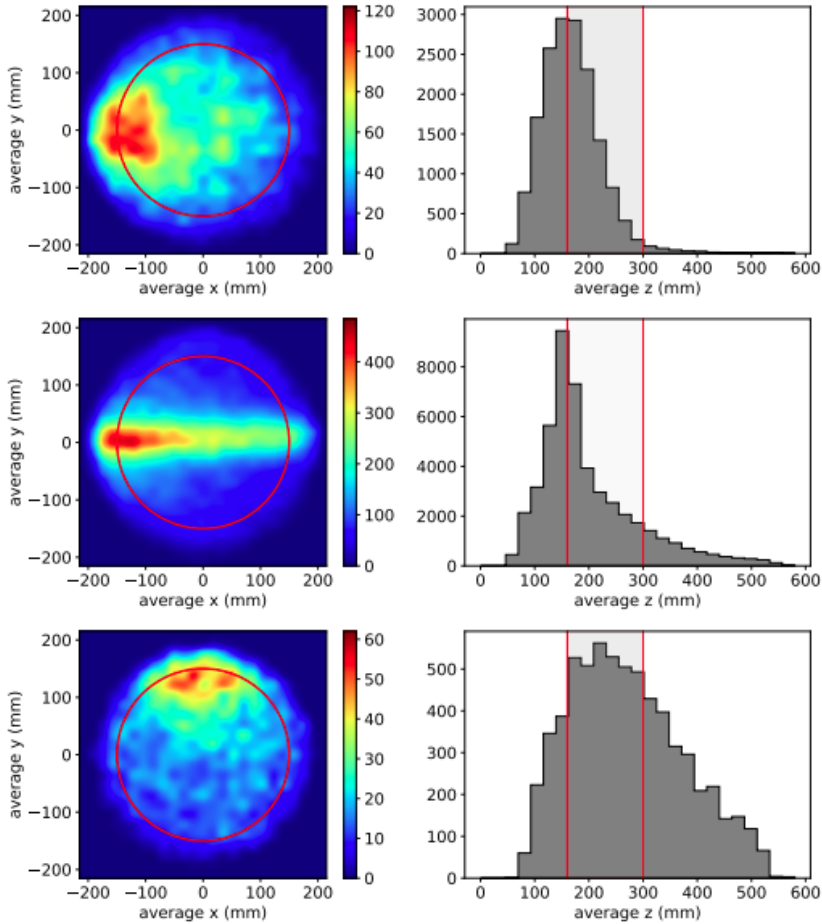


Figura 5.3: Distribuciones de ubicaciones de eventos promedio en (x, y) (izquierda) y z (derecha), para eventos en la región del pico de rayos X de xenón $\in (28, 32)$ keV (arriba), el fotopico de ^{137}Cs , $\in (650, 675)$ keV (centro), y eventos en la región del pico de doble escape, $\in (1550, 1640)$ keV (abajo). Las líneas rojas indican las regiones fiduciales restringidas descritas.

5.1.4 Calibración de energía absoluta

La energía de un evento Q , determinado integrando la señal S_2 medida, se expresa en fotoelectrones utilizando factores de conversión determinados por la calibración de los PMT. Para determinar la escala de energía absoluta la respuesta medida del detector se comparó con los valores nominales de las energías del evento. Para ello se utilizaron tres muestras de eventos: el pico de rayos X de xenón de 29,7 keV, el pico ^{137}Cs , y el pico de doble escape. Las energías nominales fueron tomadas de [S.Y.F. Chu y Firestone [s.f.](#)] e incluyen el promedio ponderado de intensidad de las líneas de rayos X $K\alpha$ (29.669 keV), la energía del ^{137}Cs emitido gamma (661,6 keV), y la energía del pico de doble escape (1592,5 keV).

5.1.5 Resolución en energía

A partir de una muestra de eventos monoenergéticos, la resolución de energía se puede determinar como la relación de la distribución FWHM de energía al valor medio de la respuesta. A bajas energías la energía las deposiciones son casi puntuales y la resolución de energía está dominada por el término estocástico reflejando las fluctuaciones en la producción de pares de iones de electrones. La medición para los eventos de altas energías implican una suma de las deposiciones de energía sobre el volumen más grande del detector. Estos eventos necesitan ser corregidos por la variación de la respuesta debido a la vida útil del electrón y/o las faltas de homogeneidad del detector y las imperfecciones residuales de las correcciones pueden contribuir a la resolución energética (un error sistemático).

La importancia relativa de varias contribuciones puede ser estimada por comparación de la resolución de energía observada a diferentes energías: el término estocástico se espera que siga la dependencia $1/\sqrt{E}$ de la energía mientras que la contribución sistemática se espera que sea independiente de la energía. Por tanto, se espera que la variación de la resolución en energía siga:

$$R(E) = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + c^2} \quad (5.1)$$

O equivalentemente

$$R^2(E) = \frac{a^2}{E} + c^2 \quad (5.2)$$

donde $a/\sqrt{E}$ es el término estocástico y c es el término sistemático y constante. Contribuciones potenciales de ruido, se comportan como b/E , se espera que sean despreciables en nuestro caso.

5.1.6 Rayos X en Xenón

La Figura 5.4 muestra la distribución de energía de los clústeres aislados de baja energía identificados dentro del volumen fiduciario. Se atribuyen dos picos visibles a varias líneas cerca de 29,7 keV y a varias líneas cerca de 34 keV. La distribución observada está bien descrita por una combinación de dos gaussianas y un polinomio de segundo grado. Como las líneas de rayos X más intensas en el pico de menor energía están mucho más juntas que en el pico de mayor energía, el ancho de la Gaussiana más a la izquierda, $(5,71 \pm 0,40) \%FWHM$, se toma para representar la resolución de energía a 29,7 keV. El error en la resolución es principalmente de origen sistemático y se estimó variando los rangos de binning y ajuste, variando ligeramente los cortes fiduciales, y considerando los errores estadísticos del ajuste, que fueron menores o iguales a la mitad del error declarado.

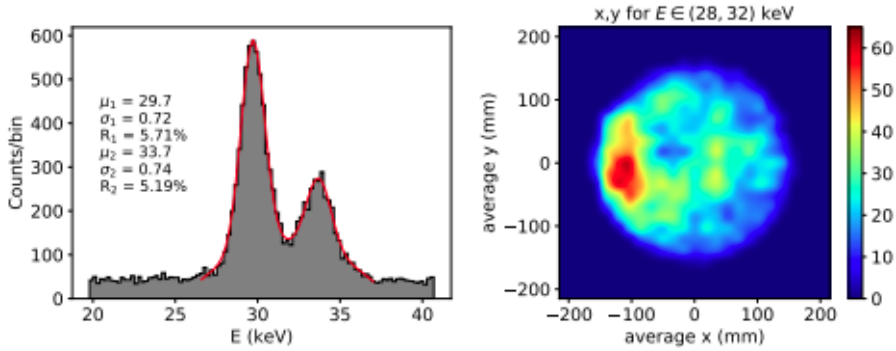


Figura 5.4: (Izquierda) Ajuste de los picos de rayos X en xenón a dos gaussianas + un polinomio de segundo orden. (Derecha) La distribución resultante (x,y) de eventos incluidos en el ajuste.

5.1.7 Gammas de alta energía

Para determinar la resolución de energía del detector a energías más altas, la distribución de energía observada en la vecindad del pico de 661,6 keV se ajustó como la suma de un polinomio gaussiano + un polinomio de segundo orden, y, de manera similar, la distribución de la energía observada en la región del pico de doble escape se ajustó como la suma de una Gaussiana + exponencial (ver Figura 5.5). Los ajustes dan los resultados: $R(661,6 \text{ keV}) = (1,45 \pm 0,10) \% \text{ FWHM}$ y $R(1592,5 \text{ keV}) = (1,11 \pm 0,10) \% \text{ FWHM}$. Los errores sobre la resolución se estimaron de la misma manera que para el caso de rayos X.

Al realizar un ajuste a la Ecuación 5.2, los valores medidos de la resolución de energía pueden ser extrapolados a $Q_{\beta\beta}$ dando como resultado $R(Q_{\beta\beta}) = (1,02 \pm 0,09) \% \text{ FWHM}$. El ajuste, que se muestra en la Figura 5.6, da a $a = (0,98 \pm 0,07) \% \text{ FWHM} \cdot \text{MeV}$ e indica la presencia de un término constante significativo $c = (0,80 \pm 0,11) \% \text{ FWHM}$ que domina la resolución de energía en $Q_{\beta\beta}$. Este término refleja el estado inicial del detector y es probable que esté relacionado con una vida útil del electrón relativamente pobre durante los *runs* de calibración.

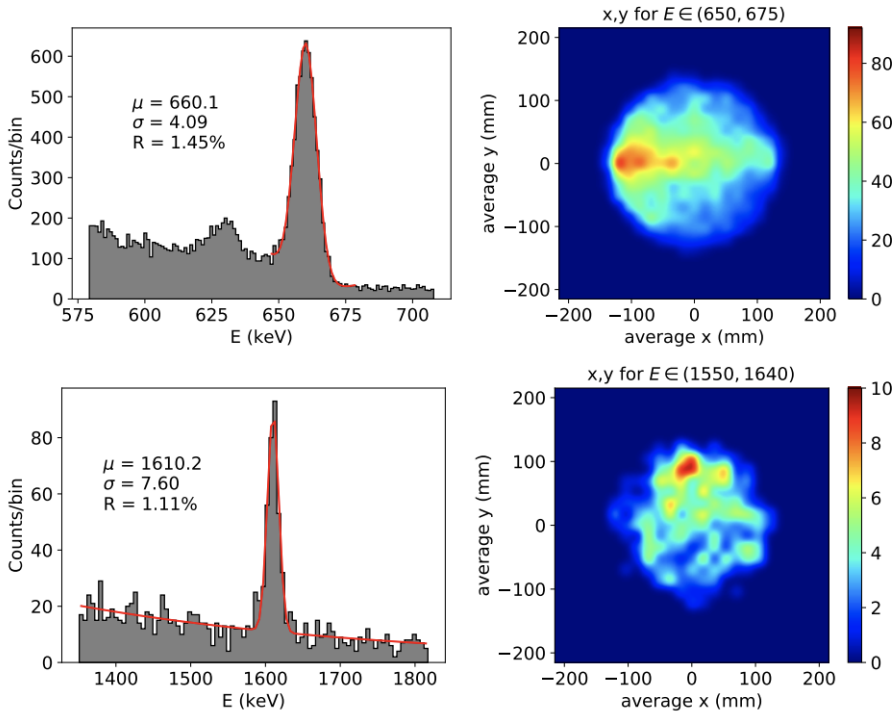


Figura 5.5: (Arriba a la izquierda) Ajuste del fotopico de ^{137}Cs a un polinomio gaussiano + un polinomio de segundo orden en la región fiduciaria óptima seleccionada y (arriba a la derecha) la distribución resultante (x,y) de eventos incluidos en el ajuste. (Abajo a la izquierda) Ajuste del pico de doble escape de 1592,5 keV en la región fiduciaria óptimo seleccionada y (abajo a la derecha) la distribución resultante (x,y) de eventos en la región pico.

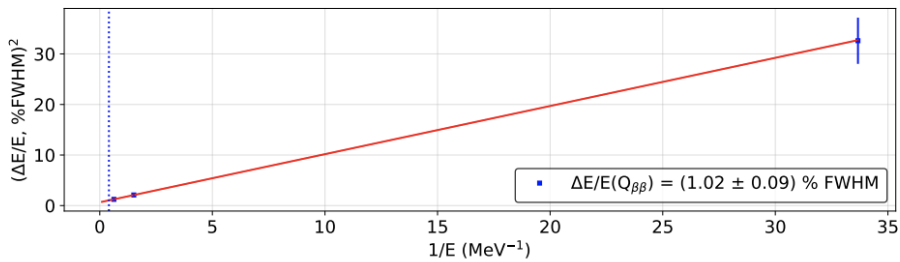


Figura 5.6: $\%FWHM^2$ en función de $1/E$. La línea roja representa un ajuste a la Ecuación 5.2, la línea vertical azul punteada indica la posición de $Q_{\beta\beta}$.

"La ciencia es la sistemática clasificación de la experiencia"

– George Henry Lewes

6

Líneas futuras: NEXT-100

En este capítulo se van a abordar los cambios que son necesarios implementar NEXT-100 a partir de los elementos desarrollados en NEXT-White. Después de tener el detector NEXT-White en marcha durante un largo periodo de tiempo, han surgido problemas a solucionar para el futuro detector que se empezó a construir a mediados de 2023.

6.1 Estudios de la problemática

En el planteamiento de NEXT-100 se encuentran problemas relacionados con el escalado de las soluciones desarrolladas para NEXT-White. Entre ellos cabe mencionar especialmente la dificultad a la hora de extraer el cableado de ambos planos de detección, en concreto en el plano de energía se pasa de 12 PMTs

en NEXT-White a 60 PMTs en NEXT-100. Teniendo en cuenta los problemas sufridos durante la vida de NEXT-White con los conectores actuales, no era una opción y se decidió explorar otras vías, tanto de conectores como de pasamuros. Otro problema añadido está relacionado con los estrictos requerimientos de radiopuerza que obligaron a seleccionar componentes muy concretos para las bases de los PMTs. Con el transcurso del tiempo los distribuidores y fabricantes han ido modificando su oferta de componentes y es necesario encontrar nuevas referencias que cumplan las especificaciones del experimento.

6.2 Soluciones adoptadas

Las soluciones adoptadas ante la problemática se detalla a continuación.

6.2.1 Pasamuros y conectores

Teniendo en cuenta la cantidad de PMTs de NEXT-100, se debía encontrar la manera de extraer de la vasija el cableado con el menor número de pasamuros posibles. Para ello se decidió utilizar conectores multipines. Después de explorar el mercado y contactar con diferentes empresas, se seleccionaron pasamuros y conectores de la empresa Tera Torr Technologies. En la figura 6.1 se muestra el tipo de conector elegido, un conector de 32 pines (MIL-C-26482), con lo que teniendo en cuenta que de cada base de PMT emplea 3 cables (Anodo, último dínodo y masa), en total se podrían soportar hasta 10 PMTs por conector. En la figura 6.2 se muestra el esquema del pasamuros con 3 conectores creado exclusivamente para NEXT, con capacidad para 30 PMTs en total. Para instalar la totalidad de PMTs sólo se necesitarían necesitaríamos 2 pasamuros CF100, en lugar de los 15 necesarios en caso de utilizar los mismos que hay en el detector NEXT-White.



Figura 6.1: Conector multipin para NEXT-100

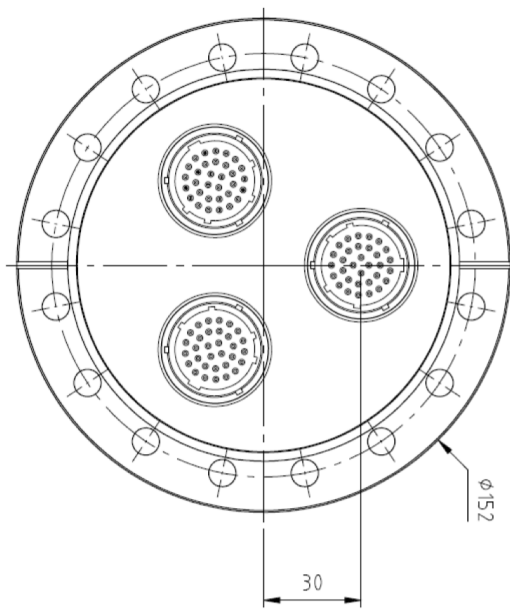


Figura 6.2: Pasamuros CF100 para NEXT 100

Este tipo de pasamuros y conector se ha testeado en el detector NEXT-DEMO. Dado que el detector NEXT-DEMO tiene 3 PMTs, el conector es el mismo pero de 10 pines en lugar de 32. Se han realizado pruebas mecánicas de estanqueidad,

difusión etc. y pruebas eléctricas de integridad de señal, cortocircuitos, o sobreconsumo de corrientes por derivaciones o fugas.

Finalmente, después de algunos meses de funcionamiento y tras las pruebas comentadas anteriormente se decidió dar por válido, tanto el conector como el pasamuros para NEXT-100. En la figura 6.3 se puede ver el plano de energía de NEXT-DEMO con el conector multipin conectado.

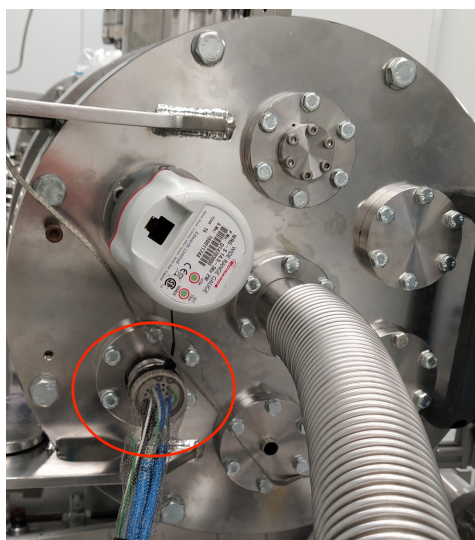


Figura 6.3: Pasamuros y conector en DEMO++

6.2.2 Resistencias de las bases

Tras conocer que las resistencias de $2M\Omega$, $3M\Omega$ y $4M\Omega$ empleadas en NEXT-White ya no se encontraban disponibles en el mercado, debido a que la empresa Finechem dejó de fabricarlas, se planificó una nueva campaña de mediciones de radiopureza de nuevos modelos sustitutivos de los actuales. Los modelos finalmente elegidos fueron HVC1206-4MOJT3 ($4M\Omega$) [Welwyn [s.f.](#)], MC0125W120613M ($3M\Omega$) [Multicomp [s.f.\(b\)](#)] y MCPWR06FTEO2004 ($2M\Omega$) [Multicomp [s.f.\(a\)](#)] . Después de encontrar las resistencias candidatas se tomó la decisión de comprar la cantidad necesaria para NEXT-100 directamente para proceder a su evaluación ya que el bajo coste de las mismas permitía un ahorro

significativo en tiempo. Así mismo la medición de su radiopureza es más precisa al emplear una masa mayor de elementos medidos. Afortunadamente tras medir las resistencias elegidas [NEXT [s.f.](#)] el equipo de radiopureza del *laboratorio subterráneo de Canfranc*, éstas eran mas radiopuras que las anteriores, mejorando de ese modo la radioactividad total.

6.2.3 Evolución en las medidas de energía. De NEXT-100 a NEXT-HD

El siguiente paso en la evolución de la medida de energía en el experimento NEXT pasa por cambiar el plano de sensores, de PMTs a SIPMs y fibras ópticas. Esta evolución se verá en un prototipo en el que se está trabajando llamado NEXT-HD [Soleti y others. [2024](#)].

NEXT-HD será un experimento a escala de tonelada que seguirá a NEXT-100 e incorporará un diseño simétrico con un cátodo y dos ánodos. Para este detector, la colaboración está considerando implantar un barril de fibras con cambio de longitud de onda leídas por SIPMs para medir la energía de las partículas que interactúan en el gas xenón.

Dentro de NEXT el subproyecto electrónica NEXT-100 & asics para el plano de trazas de NEXT-HD [Herrero [s.f.](#)] en el que me encuentro involucrado presenta dos objetivos diferentes, la operación de NEXT-100 y el desarrollo de una nueva electrónica frontend basada en ASICs y un nuevo DAQ para NEXT-HD que será testeada en HD-DEMO. El equipo encargado de este proyecto ha liderado el desarrollo del DAQ, parte del sistema de control, PMT, el frontend de SiPMs y el sistema en línea del detector NEXT-White. Por ello, el equipo contribuirá a la operación del detector NEXT-100 proporcionando el mantenimiento de los módulos electrónicos de frontend, DAQ y parte de los sistemas de control. Las especificaciones de NEXT-HD requieren una nueva arquitectura para todos los sistemas electrónicos, la cual debe ser diseñada desde cero. Este subproyecto desarrollará una solución basada en un ASIC que permitirá aumentar la cantidad y densidad de canales leídos por los Planos Densos de SiPM (DSP). El nuevo frontend estará compuesto por un Front-end Analógico Integrado (AF) y un concentrador de comunicaciones digitales (CH) basado en FPGAs, instalados cerca del DSP en el interior de la vasija. Esto permitirá reducir el número

de líneas que se envían al DAQ externo, simplificando así la complejidad del pasamuros. Además, todos los sistemas electrónicos del frontend deben cumplir con las especificaciones de radiopureza y mantener un bajo consumo de energía para no interferir con el resto de los procesos del detector.

*"La experiencia no es lo que te ocurre, es lo que haces
con lo que te ocurre"*

– Aldous Huxley

7

Conclusiones

Los objetivos definidos para esta tesis se han centrado en el estudio, diseño, producción e instalación de la electrónica implicada en el plano de energía del experimento NEXT. Como se ha explicado, todos los estudios y desarrollos realizados durante este periodo se han aplicado al detector NEXT-White, y se piensa que son escalables para el siguiente paso: el detector NEXT-100. Vistos en detalle, los objetivos iniciales frente a los correspondientes trabajos desarrollados y resultados alcanzados son:

- Diseño, producción e instalación de las bases de polarización de los PMT

Tal y como se describe en el capítulo 3.6, las bases de polarización fueron cuidadosamente diseñadas, y se fabricaron varias versiones hasta conseguir el rendimiento óptimo con la mínima radioactividad posible.

Los requisitos de baja radiactividad hacían imposible colocar la mayoría de componentes electrónicos del mercado en el volumen activo del detector, por lo que se necesitaba una solución específica para resolver este problema, por ello se hizo un barrido del mercado y se realizó la medida de radioactividad de muchos componentes hasta dar con los adecuados. El diseño se reutilizará para NEXT-100.

- Diseño y producción de la electrónica de acondicionamiento para los fotomultiplicadores del experimento NEXT, ajustándose a todas las prestaciones requeridas.

Basándonos en los requisitos del experimento se diseñó una solución personalizada. Tras varias iteraciones completas del proceso se alcanzó la versión definitiva. En el capítulo 3.4 se explica como se ha desarrollado y probado con éxito la electrónica Front-end. Las prestaciones del front-end desarrollado cumplen todos los requisitos deseados, como la resolución energética requerida para poder distinguir los eventos $\beta\beta$ sin neutrinos que debe ser inferior al 1 %, buena relación señal/ruido y buena linealidad. Este front-end fue el tema principal de un artículo publicado en 2019 [Alvarez y col. 2019].

- Algoritmo BLR

En el capítulo 3.5 se explica el algoritmo de restauración de línea de base (BLR) desarrollado para una correcta interpretación de los datos, debido a que era necesario implementar un algoritmo que permitiera recomponer la forma original de las señales, ya que, al pasar la señal por el condensador de acoplo ésta cambia de forma.

El algoritmo implementado se basa en la función inversa de un filtro paso alto, ya que el condensador de acoplo del FEE actúa como un filtro paso alto deformando la señal. Una buena cualidad es que el algoritmo se activa cuando se detecta un pulso y después se apaga cuando el pulso termina. Esto se traduce en que una gran cantidad de ruido de baja frecuencia filtrado por el condensador de acoplo AC no se volverá a introducir en el sistema, ya que es más lento que la longitud del pulso.

- Slow control

Estaba previsto que el Slow Control fuera desarrollado por un grupo externo pero, debido al buen rendimiento obtenido por el primer software diseñado por el grupo de electrónica de NEXT, la decisión final fue mantener esta vía y desarrollar el sistema completo en casa. Por este motivo, el tesitando, como parte del grupo de electrónica de NEXT realizó una importante contribución al desarrollo del software. Ahora mismo, el NEXT Slow Control es un sistema de control autónomo capaz de tomar decisiones basadas en los datos proporcionados por la red de sensores distribuidos por todo el sistema. Todos y cada uno de los dispositivos se controlan y supervisan a través del Slow Control, compuesto por cuatro ordenadores y un PLC basado en FPGA, y sólo las partes más sensibles relacionadas con el sistema de gas quedan a cargo de los usuarios.

- Líneas futuras: NEXT-100

Después de todo el trabajo desarrollado para NEW sabemos que hay algunos puntos a mejorar para el siguiente prototipo, NEXT-100. Un elemento problemático se encuentra en los conectores del pasamuros de los PMTs, ya que aumentamos de 12 a 60 PMTs, después de explorar el mercado y contactar con diferentes empresas, se seleccionaron pasamuros y conectores multipin de la empresa Tera Torr Technologies que nos ofrecen versatilidad y robustez.

El otro punto conflictivo son las resistencias, ya que el fabricante dejó de fabricarlas lo que supuso una nueva búsqueda, así como volver a medir su radiopureza una vez teníamos resistencias candidatas.

Durante los últimos años NEW ha estado tomando datos y demostrándonos como mejorar el detector. Toda la experiencia adquirida se está utilizando en el diseño y construcción de NEXT-100. Algunos subsistemas, como el sistema de gas o el castillo de plomo, podrán reutilizarse o ampliarse fácilmente para este detector más grande. Pero casi todos los subsistemas restantes necesitan una actualización adecuada para adaptarse a los nuevos requisitos. Por ejemplo, el plano de energía, que es el tema principal de esta tesis, será unas cinco veces

mayor que el de NEW. Aunque los PMTs utilizados son exactamente los mismos, la resistencias de las bases cambian, así como los conectores de los pasamuros. Además hay otras cuestiones a tener en cuenta como el cableado interno que no puede escalar directamente desde NEW, y debe rediseñarse teniendo en cuenta que el plano ahora es mucho más denso y tendremos diferentes medidas de cableado.

Así que aún queda mucho trabajo por hacer antes de que NEXT-100 arranque definitivamente para tomar datos, pero esta vez la base es más sólida que nunca gracias a los conocimientos aprendidos durante este periodo de duro trabajo.

Además cabe destacar que el experimento NEXT ha logrado varios hitos científicos significativos en su investigación sobre la desintegración beta doble sin neutrinos ($\beta\beta 0\nu$) y la física de neutrinos. A continuación, se destacan algunos de estos logros:

- Pruebas de tecnología de xenón a alta presión: NEXT ha demostrado con éxito el uso de xenón gaseoso a alta presión como medio de detección, lo que permite una mejor resolución energética y la identificación clara de eventos de desintegración beta doble.
- Desarrollo de detectores avanzados: La colaboración NEXT ha desarrollado y puesto en operación detectores avanzados, como NEXT-White, que han permitido pruebas detalladas y han demostrado la viabilidad de la tecnología propuesta para detectar la desintegración beta doble sin neutrinos.
- Detección y mitigación de ruido de fondo: NEXT ha hecho avances significativos en la reducción del ruido de fondo, lo que es crucial para detectar eventos raros como la desintegración beta doble sin neutrinos. Esto incluye el desarrollo de técnicas para identificar y discriminar señales de fondo de las señales de interés.
- Resultados en la búsqueda de $\beta\beta 0\nu$: Aunque hasta ahora no se ha observado la desintegración beta doble sin neutrinos, NEXT ha establecido límites importantes sobre la vida media de este proceso, contribuyendo

valiosamente al campo de la física de neutrinos y proporcionando datos cruciales para futuras investigaciones.

- Desarrollo de nuevas tecnologías de lectura: La colaboración ha avanzado en el desarrollo de tecnologías de lectura como el uso de sensores de luz (SiPMs) y sistemas de adquisición de datos (DAQ) de última generación, que mejoran la sensibilidad y precisión de las medidas.
- Resolución energética: NEXT ha logrado una resolución energética de aproximadamente el 1 % a 2.5 MeV, lo cual es crucial para distinguir la señal de desintegración beta doble sin neutrinos del fondo radiactivo. Este nivel de precisión es uno de los mejores en la búsqueda de este fenómeno.
- Calibración y control de sistemas: NEXT ha desarrollado sofisticados sistemas de calibración y control que permiten monitorear y ajustar las condiciones experimentales en tiempo real. Esto asegura que los datos recolectados sean de alta calidad y confiabilidad.
- Validación de modelos teóricos: Los resultados obtenidos por NEXT han sido fundamentales para validar y refinar modelos teóricos relacionados con la física de neutrinos y la desintegración beta doble. Estos modelos son esenciales para interpretar los datos y orientar futuras investigaciones.

Estos logros destacan la relevancia del experimento NEXT en la física de partículas y su contribución significativa a la búsqueda de nueva física, así como su impacto en la formación de la próxima generación de científicos y en el desarrollo de tecnologías avanzadas.

Estos hitos subrayan la contribución de NEXT al entendimiento de los neutrinos y la búsqueda de nueva física más allá del Modelo Estándar.

Publicaciones

Readout and data acquisition in the NEXT-NEW Detector based on SRS-ATCA (Esteve y col. [2016](#))

Radiopurity assessment of the energy readout for the NEXT double beta decay experiment (Cebrián y col. [2017](#))

The Next White (NEW) detector (Monrabal y col. [2018](#))

Initial results on energy resolution of the NEXT-White detector (Renner y col. [2018](#))

Calibration of the NEXT-White detector using ^{83m}Kr decays (Martinez-Lema y col. [2018](#))

The electronics of the energy plane of the NEXT-White detector (Alvarez y col. [2019](#))

Energy calibration of the NEXT-White detector with 1 % resolution near $Q\beta\beta$ of ^{136}Xe (J. Renner y col. [2019](#))

Lista de acronimos

TPC	Cámara de proyección temporal
LSC	Laboratorio subterráneo de Canfranc
NME	Nuclear matrix elements
SOFT	TPC con funciones separadas y optimizadas
SM	Modelo estándar
FWHM	Full width half maximum
HPGe	Detector de Germanio de alta pureza
PTFE	Teflón
HPXe-EL	TPC con xenon a alta presión con amplificación electroluminescente
PMT	Fotomultiplicador
APD	Fotodiodo de avalancha
VUV	Ultravioleta
EL	Electroluminiscencia
SIPM	Fotomultiplicador de Silicio
NEW	NEXT-White
PLC	Controlador lógico programable

FPGA	Field-programmable gate array
HDPE	Polietileno de alta densidad
ITO	Óxido de indio-estaño
TPB	Tetrafenyl butadieno
LNGS	Laboratorio nacional del Gran Sasso
NTC	Sensor de temperatura
DB	Dice-board
FEE	Front-end electronics
ADC	Convertidor analógico-digital
DAQ	Sistema de adquisición de datos
SRS	Sistema de lectura escalable
DTCC	Data, Trigger, Clock and Control
LVDS	Señal diferencial de bajo voltaje
SFTP	Protocolo de transferencia segura de archivos
SC	Slow control
WLS	Desplazadora de longitud de onda
IFIC	Instituto de Física Corpuscular
LDO	Low voltage dropout
HPF	Filtro paso-alto
BLR	Restauración de línea base
SPE	Single photo electron

Referencias

- Agostini, M. y col. (2015a). «Production, characterization and operation of ^{76}Ge enriched BEGe detectors in GERDA». En: *Eur. Phys. J. C* 75.2, pág. 39. doi: [10.1140/epjc/s10052-014-3253-0](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-3253-0). arXiv: [1410.0853](https://arxiv.org/abs/1410.0853) [[physics.ins-det](#)] (vid. pág. 5).
- Agostini, M. y col. (2015b). «Results on $\beta\beta$ decay with emission of two neutrinos or Majorons in ^{76}Ge from GERDA Phase I». En: *Eur. Phys. J. C* 75.9, pág. 416. doi: [10.1140/epjc/s10052-015-3627-y](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3627-y). arXiv: [1501.02345](https://arxiv.org/abs/1501.02345) [[nucl-ex](#)] (vid. pág. 5).
- Alvarez, V. y col. (2013). «Operation and first results of the NEXT-DEMO prototype using a silicon photomultiplier tracking array». En: *JINST* 8, P09011. doi: [10.1088/1748-0221/8/09/P09011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/09/P09011). arXiv: [1306.0471](https://arxiv.org/abs/1306.0471) [[physics.ins-det](#)] (vid. pág. 28).
- Álvarez, V. y col. (2011). «The NEXT-100 experiment for neutrinoless double beta decay searches (Conceptual Design Report)». En: arXiv: [1106.3630](https://arxiv.org/abs/1106.3630) [[physics.ins-det](#)] (vid. pág. 36).
- Álvarez, V. y col. (2012a). «Near-Intrinsic Energy Resolution for 30 to 662 keV Gamma Rays in a High Pressure Xenon Electroluminescent TPC». En: *Nucl. Instrum. Meth. A* 708, págs. 101-114. doi: [10.1016/j.nima.2012.12.123](https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.123). arXiv: [1211.4474](https://arxiv.org/abs/1211.4474) [[physics.ins-det](#)] (vid. pág. 63).

- Álvarez, V. y col. (2012b). «NEXT-100 Technical Design Report (TDR): Executive Summary». En: *JINST* 7, T06001. DOI: [10.1088/1748-0221/7/06/T06001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/T06001). arXiv: [1202.0721 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1202.0721) (vid. pág. 16).
- Álvarez, V. y col. (2012c). «Radiopurity control in the NEXT-100 double beta decay experiment: procedures and initial measurements». En: *JINST* 8, T01002. DOI: [10.1088/1748-0221/8/01/T01002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/01/T01002). arXiv: [1211.3961 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1211.3961) (vid. págs. 36, 134, 135).
- Álvarez, V. y col. (2013). «Initial results of NEXT-DEMO, a large-scale prototype of the NEXT-100 experiment». En: *JINST* 8, P04002. DOI: [10.1088/1748-0221/8/04/P04002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/P04002). arXiv: [1211.4838 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1211.4838) (vid. pág. 10).
- Alvarez, V., V. Herrero-Bosch, R. Esteve y col. (2019). «The electronics of the energy plane of the NEXT-White detector». En: *Nucl. Instrum. Meth.* A917, págs. 68-76. DOI: [10.1016/j.nima.2018.11.126](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.126). arXiv: [1805.08636 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1805.08636) (vid. págs. 115, 154, 159).
- Aprile, E. y col. (2011a). «Material screening and selection for XENON100». En: *Astropart.Phys.* 35, págs. 43-49. DOI: [10.1016/j.astropartphys.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2011.06.001). arXiv: [1103.5831 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1103.5831) (vid. pág. 134).
- Aprile, E., K. Arisaka, F. Arneodo y col. (2011b). «Material screening and selection for XENON100». En: *Astroparticle Physics* 35.2, págs. 43-49. ISSN: 0927-6505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2011.06.001>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650511000971> (vid. pág. 20).
- Araldite 2011. *Epoxy adhesive in two components*. (s.f.). <https://www.generaladhesivos.com/proveedor-pegamento/9hoja-tecnica-tds-araldite-2011.pdf> (vid. pág. 112).

- Auger, M. y col. (2012). «Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{136}Xe with EXO-200». En: *Phys.Rev.Lett.* 109, pág. 032505. DOI: [10.1103/PhysRevLett.109.032505](#). arXiv: [1205.5608 \[hep-ex\]](#) (vid. pág. 7).
- AVX (s.f.). *Condensadores de tantalio*. <https://www.mouser.es/datasheet/2/40/TCJ-2887130.pdf> (vid. pág. 133).
- Bandac, I. y others. (2017). «Ultra-low background and environmental measurements at Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)». En: 2017.126. DOI: [10.1016/j.apradiso.2017.02.046](#). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804316306017?via%3DiHub> (vid. pág. 129).
- Caen (s.f.). *Fuente de alimentación CAEN*. <https://www.caen.it/products/n1470/> (vid. pág. 121).
- Carena, F. y col. (2014). «The ALICE data acquisition system». En: *Nucl. Instrum. Meth. A* 741, págs. 130-162. DOI: [10.1016/j.nima.2013.12.015](#) (vid. pág. 33).
- Cebrián, S. y col. (2017). «Radiopurity assessment of the energy readout for the NEXT double beta decay experiment». En: *JINST* 12.08, T08003. DOI: [10.1088/1748-0221/12/08/T08003](#). arXiv: [1706.06012 \[physics.ins-det\]](#) (vid. págs. 59, 113, 130-132, 159).
- Esteve, R., J. Toledo, J. Rodríguez y col. (2016). «Readout and data acquisition in the NEXT-NEW Detector based on SRS-ATCA». En: *Journal of Instrumentation* 11.01, pág. C01008. URL: <http://stacks.iop.org/1748-0221/11/i=01/a=C01008> (vid. págs. 33, 104, 159).
- Gando, A. y col. (2013). «Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of Xe-136 from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in Ge-76». En: *Phys.Rev.Lett.* 110, pág. 062502. arXiv: [1211.3863 \[hep-ex\]](#) (vid. págs. 6, 8).

- Granena, F. y col. (2009). «NEXT, a HPGXe TPC for neutrinoless double beta decay searches». En: arXiv: 0907.4054 [hep-ex] (vid. pág. 36).
- Hamamatsu book 4 edition. (s.f.). https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4E.pdf (vid. págs. 45, 48-54).
- Herrero, Vicente (s.f.). *Electronica NEXT-100 & asics para el plano de trazas de NEXT-HD*. <https://aplicat.upv.es/exploraupv/ficha-proyecto/proyecto/20220610> (vid. pág. 151).
- INC, Cremat (s.f.). *CR-210-R0 baseline restorer (BLR)*. <https://www.cremat.com/CR-210-R0.pdf> (vid. pág. 98).
- J. Renner, and, G. Díaz López, P. Ferrario y col. (2019). «Energy calibration of the NEXT-White detector with 1 % resolution near $Q\beta\beta$ of ^{136}Xe ». En: *Journal of High Energy Physics* 2019.10. DOI: 10.1007/jhep10(2019)230. URL: <https://doi.org/10.1007%2Fjhep10%282019%29230> (vid. pág. 159).
- M. J. Schmand, L. City y N. Zhang (2011). *BASELINE RESTORE BASED ON DIODE STAR CONFIGURATION AND TRANSFORMER COUPLING (Patent)*. <https://patentimages.storage.googleapis.com/c5/c8/6a/ec2dda0dacc326/US7924079.pdf> (vid. pág. 98).
- Majorana, Ettore (1937). «Theory of the Symmetry of Electrons and Positrons». En: *Nuovo Cim.* 14, págs. 171-184. doi: 10.1007/BF02961314 (vid. pág. 2).
- Maneschg, W., M. Laubenstein, D. Budjas y col. (2008). «Measurements of extremely low radioactivity levels in stainless steel for GERDA». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 593.3, págs. 448-453. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.05.036>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208007833> (vid. pág. 20).

- Martín-Albo, J. y col. (2016). «Sensitivity of NEXT-100 to Neutrinoless Double Beta Decay». En: *JHEP* 05, pág. 159. doi: [10.1007/JHEP05\(2016\)159](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2016)159). arXiv: [1511.09246 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1511.09246) (vid. pág. 3).
- Martinez-Lema, G. y col. (2018). «Calibration of the NEXT-White detector using ^{83m}Kr decays». En: *JINST* 13.10, P10014. doi: [10.1088/1748-0221/13/10/P10014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/10/P10014). arXiv: [1804.01780 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1804.01780) (vid. págs. 108, 139, 141, 159).
- Martoiu, S., H. Muller, A. Tarazona y col. (2013). «Development of the scalable readout system for micro-pattern gas detectors and other applications». En: *JINST* 8, pág. C03015. doi: [10.1088/1748-0221/8/03/C03015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/03/C03015) (vid. pág. 33).
- Maxim (s.f.[a]). *Kit de lectura de sensor de temperatura DS18B20*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds9090k.pdf> (vid. pág. 122).
- Maxim (s.f.[b]). *Sensor de temperatura DS18B20*. <https://www.farnell.com/datasheets/2345098.pdf> (vid. pág. 121).
- Monrabal, F. y col. (2018). *The Next White (NEW) detector*. <https://arxiv.org/pdf/1804.02409.pdf> (vid. págs. 28, 105, 159).
- Multicomp (s.f.[a]). *Hoja de datos resistencia 2M*. <https://www.farnell.com/datasheets/2873396.pdf> (vid. pág. 150).
- Multicomp (s.f.[b]). *Hoja de datos resistencia 3M*. <https://www.farnell.com/datasheets/1729048.pdf> (vid. pág. 150).
- NEXT, Equipo radiopureza (s.f.). *Informe radiopureza resistencias Farnell*. https://next.ific.uv.es/DocDB/0008/000861/001/report_radiopurity_ResistorsSMD_Farnell.pdf (vid. pág. 151).

- Nygren, David (2009). «High-pressure xenon gas electroluminescent TPC for $0 - \nu \beta\beta$ -decay search». En: *Nucl.Instrum.Meth.* A603, págs. 337-348. doi: [10.1016/j.nima.2009.01.222](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.222) (vid. pág. 8).
- P. Ferrario, and, J. M. Benlloch-Rodríguez, G. Díaz López y col. (2019). «Demonstration of the event identification capabilities of the NEXT-White detector». En: *Journal of High Energy Physics* 2019.10. doi: [10.1007/jhep10\(2019\)052](https://doi.org/10.1007/jhep10(2019)052). URL: <https://doi.org/10.1007%2Fjhep10%282019%29052> (vid. pág. 16).
- P. Novella, and, B. Palmeiro, M. Sorel y col. (2019). «Radiogenic backgrounds in the NEXT double beta decay experiment». En: *Journal of High Energy Physics* 2019.10. doi: [10.1007/jhep10\(2019\)051](https://doi.org/10.1007/jhep10(2019)051). URL: <https://doi.org/10.1007%2Fjhep10%282019%29051> (vid. pág. 16).
- Palioselitis, Dimitrios (2015). «Results on neutrinoless double beta decay of ^{76}Ge from the GERDA experiment». En: *EPJ Web Conf.* 95, pág. 04049. doi: [10.1051/epjconf/20149504049](https://doi.org/10.1051/epjconf/20149504049), [10.1051/epjconf/20159504049](https://doi.org/10.1051/epjconf/20159504049) (vid. pág. 5).
- Pfeiffer (s.f.[a]). *Bomba de vacío Hicube*. https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/shop/products/PM_S22_250_00 (vid. pág. 121).
- Pfeiffer (s.f.[b]). *Espectrometro de masas (RGA)*. https://www.ajvs.com/product_info.php?products_id=16010 (vid. pág. 121).
- Pullia, A. y others. (1996). «The switch off baseline restorer for the 120 channel silicon detector system for EXAFS at NSLS». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 126. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00811-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00811-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890029500811X?via%3DiHub> (vid. pág. 98).

- Rebel, B. y col. (2014). «High Voltage in Noble Liquids for High Energy Physics». En: *JINST* 9, T08004. DOI: [10.1088/1748-0221/9/08/T08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/08/T08004). arXiv: [1403.3613](https://arxiv.org/abs/1403.3613) [physics.ins-det] (vid. pág. 27).
- Renner, J. y col. (2018). «Initial results on energy resolution of the NEXT-White detector». En: *JINST* 13.10, P10020. DOI: [10.1088/1748-0221/13/10/P10020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/10/P10020). arXiv: [1808.01804](https://arxiv.org/abs/1808.01804) [physics.ins-det] (vid. págs. 63, 137, 138, 159).
- Soleti, R. y others. (2024). «Towards a fiber barrel detector for next-generation high-pressure gaseous xenon TPCs». En: *Journal of instrumentation* 19. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/19/04/C04042>. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/19/04/C04042/pdf> (vid. pág. 151).
- S.Y.F. Chu, L.P. Ekstrom y R.B. Firestone (s.f.). *WWW Table of Radioactive Isotopes*. <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/> (vid. pág. 143).
- Welwyn (s.f.). *Hoja de datos resistencia 4M*. <https://www.farnell.com/datasheets/2710387.pdf> (vid. pág. 150).

