



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN FÍSICA NUCLEAR

Trabajo de Fin de Máster

DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL CALORÍMETRO CALIFA

Alumno: Ángel Perea Martínez

Director: María José García Borge

Fecha: 21/09/2021



Resumen

El objetivo de este trabajo es el desarrollo y operación inicial del sistema de control de parámetros del detector CALIFA. CALIFA es un detector calorimétrico en el experimento R3B, dedicado al estudio de reacciones nucleares con haces exóticos de alta energía. R3B está situado en la instalación FAIR/GSI en Darmstadt, Alemania.

Durante los últimos años, he tomado parte en la construcción y puesta a punto del detector CALIFA y he sido responsable del desarrollo de su sistema de control. Este desarrollo se ha realizado durante varias estancias en la instalación, que se han compaginado con campañas experimentales. El uso del sistema durante esas campañas puso de manifiesto desviaciones de las prestaciones de algunos equipos con respecto al comportamiento esperado, que han repercutido en cambios sustanciales en la estructura y desarrollo de los programas.

El sistema de control consta de varios módulos repartidos en 3 ordenadores diferentes y se ha programado en Python y C++. Durante el desarrollo se eligió la estructura del sistema y los lenguajes utilizados, se identificaron los parámetros a controlar para que la ganancia del sistema sea estable y finalmente se ha desarrollado varias interfaces para poder realizar experimentos con CALIFA en 2019 y 2021.

Usando este sistema, además, se ha realizado el ajuste de ganancia para todo el detector CALIFA durante su puesta a punto durante 2021. Para ello, se escribieron códigos usando como base otros que se usaban en un banco de pruebas, adaptándolos al número de canales y la complejidad de control de CALIFA, y se diseñó y puso en funcionamiento el enlace necesario entre estos códigos nuevos y el sistema de control para poder realizar el ajuste de ganancia de manera automática. Finalmente, se realizó el ajuste de ganancia, dejando el detector calibrado a tiempo para el experimento.

Keywords: fotodetectores, R3B, Fair, Control, Diodos de avalancha,

Abstract

This master thesis describes the work done to develop a slow-control system for the CALIFA detector, and later gain-matching. CALIFA is part of the R3B setup which is part of the GSI/Fair facility in Darmstadt, Germany, aimed to the study of nuclear physics. The R3B experiment is aimed to study reactions with exotic nuclei at relativistic energies (1 AGeV)

CALIFA is a complex detector. In its present state (awaiting full completion) involves 1952 independent scintillators, designed to provide complete calorimetric information as well as high resolution measures of protons (up to 700MeV) and gammas (up to 30MeV)

I've been involved in CALIFA during its construction and commissioning, being in charge for the development and deployment of a slow-control system, needed for the first experiments. In this work, the different problems faced during the development of such a system are shown, as well as the solutions found in order to make it work on time for the early 2019 and 2021 campaigns (experiments S454, S455).

Additionally, and as a part of the integrated control of CALIFA, I designed and developed the gain-matching procedure of the detector during the 2021 campaign, in order to check the status of all the channels, as well as providing a first calibration that made online-analysis possible. Both method and results are shown here, too.

Keywords: scintillators, control, nuclear reactions, avalanche photodiode, phoswich, gain-matching, CALIFA, R3B

Índice general

Índice de figuras	IX
Glosario	XIII
1. Introducción	1
1.1. Objetivo de este trabajo	1
1.2. La instalación FAIR	2
1.3. El experimento R3B	3
1.3.1. Zona del blanco	4
1.3.2. GLAD	7
1.3.3. Detectores de fibras y de tiempo de vuelo	7
1.3.4. Neuland	10
1.4. El calorímetro CALIFA	11
1.4.1. Zona lateral (<i>Barrel</i>)	14
1.4.2. Región frontal (<i>Endcap</i>)	15
1.4.3. IPhos (I ntrinsic P hoswich)	17
1.5. Los detectores de la zona lateral de CALIFA	18
1.5.1. Dependencia de la ganancia con el voltaje de polarización	19
1.5.2. Dependencia con la temperatura	21
1.5.3. Corrección del voltaje de polarización	22

1.6.	Control del detector CALIFA	22
1.7.	Experimentos realizados en R3B significativos para este trabajo . . .	23
1.7.1.	S444: Puesta a punto (<i>commissioning</i>) del detector	23
1.7.2.	S454: Sección eficaz de $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$	24
1.7.3.	S515: Secciones eficaces de isótopos de estaño	25
2.	Diseño e implementación del sistema de control de parámetros	27
2.1.	Objetivo	27
2.2.	Requisitos	29
2.3.	Estructura de la cadena de adquisición para un canal	31
2.3.1.	Control de Temperatura	31
2.3.2.	Módulos preamplificadores	33
2.4.	Estructura global de la adquisición y el sistema de control de parámetros	35
2.4.1.	Nomenclatura de los cristales	37
2.5.	Arquitectura del software para el control	39
2.6.	La plataforma de control EPICS y los controladores alternativos . .	40
2.6.1.	Controladores alternativos	41
2.6.2.	Estructura del controlador alternativo	42
2.7.	Interfaz de consola	44
2.7.1.	Estructura interna de la aplicación	45
2.7.2.	Particularidades del funcionamiento de la aplicación	46
	Polarización de los APDs en 2 pasos	46
	Tiempo de lectura y utilización de memorias intermedias (<i>cachés</i>)	48
	Lectura y escritura entre pulsos del haz (<i>offspill</i>)	48

2.7.3.	Proceso de refresco	50
	Generación de cambios progresivos de voltaje	53
	Valores en el arranque de la aplicación	54
2.8.	Interfaz gráfica	55
2.9.	Microlenguaje de control	57
2.9.1.	Designación de cristales y grupos	58
2.9.2.	Comandos disponibles	59
2.9.3.	Estructura interna del intérprete del microlenguaje	60
3.	AJUSTE DE GANANCIA	63
3.1.	Introducción: El ajuste de ganancia	63
3.2.	Errores en los APDs	65
3.3.	Ajuste de ganancia con el voltaje	67
3.4.	Procedimiento de ajuste de ganancia	67
3.5.	Descripción de los programas de ajuste	70
3.5.1.	Programa de barrido	70
3.5.2.	Obtención de los máximos para de cada punto del barrido	76
3.5.3.	Obtención de las curvas de ganancia	80
3.5.4.	Ajuste de las ganancias según los parámetros extraídos	82
3.6.	Ajuste de ganancia de CALIFA, S454, campaña de Febrero de 2021	82
3.7.	Resultados finales	86
4.	Conclusiones y trabajo futuro	89
4.1.	Conclusiones	89
4.2.	Trabajo Futuro	91

Apéndice A.	95
A.1. Ejemplo de tabla de determinación de ganancia	95

Índice de figuras

1.1. Esquema de la instalación GSI/FAIR. En azul, las instalaciones existentes (GSI); en rojo, la ampliación FAIR. El punto amarillo indica la situación del experimento R3B	2
1.2. Disposición del experimento R3B	4
1.3. tipos de blancos en R3B	5
1.4. detectores de trazas actual y futuro para R3B	6
1.5. CALIFA en su estado actual, abierto para permitir el acceso a la cámara de reacción (en el centro)	6
1.6. Detalle del imán superconductor GLAD.	8
1.7. Esquema de la determinación del momento y masa de partículas cargadas en R3B.	9
1.8. Detectores de fibras y pared de tiempo de vuelo (<i>ToF wall</i>), para la medida de energía.	10
1.9. El detector Neuland.	11
1.10. Corte de CALIFA, visto desde detrás. Se puede apreciar la cámara de reacción con la posición del blanco. Los cristales centelleadores están coloreados en tonos rojo-hasta violeta, mientras que en el exterior se pueden apreciar los módulos preamplificadores.	12
1.11. Número de partículas con respecto al ángulo polar, para una energía de haz de 700 AMeV.	14
1.12. Corte azimutal de CALIFA, mostrando la disposición geométrica de los cristales en la zona del barrel.	15

1.13. Aspecto de un módulo del endcap, con simetría octogonal, mostrando el acoplamiento phoswich de los centelleadores [grob].	16
1.14. Gráfica E_1 vs E_{tot} para un acoplamiento phoswich (ver texto). . . .	17
1.15. Aspecto de un cristal centelleador de CsI de la zona del IPhos, con el APD montado.	17
1.16. Diseño original y solución final para los transductores.	18
1.17. Dependencia de la ganancia y la corriente de fuga con respecto al voltaje en inversa [Hamb].	20
1.18. Dependencia de la resolución en energía con el voltaje: (medida de una fuente de Cs, fuente: [groa]).	20
1.19. Dependencia de la ganancia y la corriente de fuga con respecto a la temperatura [groa].	21
1.20. Foto de una mitad de CALIFA, mostrando los módulos en el exterior y las conexiones al sistema de control y adquisición.	24
2.1. Estructura electrónica de un canal de adquisición.	31
2.2. Dependencia de la amplificación con la temperatura, (medidas de la colaboración, con fuente de Cs, fuente [groa]).	32
2.3. Preamplificador MPRB32 de Mesytec, junto con diagrama interno. .	34
2.4. Acoplamiento de los preamplificadores a la estructura externa de CALIFA.	36
2.5. Esquema de la arquitectura hardware para el control de CALIFA (explicación en el texto).	37
2.6. Esquema de la nomenclatura de los cristales y correspondencia entre los dos diferentes sistemas, a nivel de módulos.	38
2.7. Esquema de la arquitectura EPICS.	40
2.8. Captura de pantalla del menú principal de la aplicación de consola. .	44
2.9. Captura de pantalla de la aplicación de consola, menú para un preamplificador determinado (en este caso, Anillo 4, posición 2).	45

2.10. Estructura interna de la aplicación de línea de comandos.	47
2.11. Distribución de los pulsos, tal y como los captura la aplicación. En verde, se puede ver el tiempo que dedica a la lectura/escritura. . . .	50
2.12. Captura de pantalla del menú principal de la aplicación gráfica, mostrando su ejecución en el explorador de internet.	56
2.13. Captura de pantalla del menú de un preamplificador en la aplicación gráfica.	57
3.1. Espectro de la fuente de cobalto en un detector individual (Mitad 2, SFP0, Tarjeta 1, canal 1, situado en el anillo 3 de CALIFA. Se puede observar el pico de 1173 keV colocado en el canal 1000.	69
3.2. Espectro de la fuente de cobalto en un cristal (wixhalf, sfp2, fbx3). .	77
3.3. Ejemplo del ajuste a los dos picos para el espectro de la figura 3.2. .	79
3.4. Ejemplo de ajuste para un canal normal.	80
3.5. Ejemplo de ajuste para un canal con la ganancia errónea, pero funcionando correctamente. (Al disminuir el voltaje, se pierde la señal del primer pico y con ella, el ajuste).	81
3.6. Ejemplo de ajuste para un canal con problemas en la electrónica. El canal del centroide de los picos no varía con la variación de polarización.	81
3.7. Espectros para los casos de las figuras 3.5 y 3.6.	82
3.8. Situación de partida en la campaña de 2021. Histograma de la posición inicial de los picos de la fuente de cobalto (1173.2 keV en rojo, 1332.5 keV en azul. Ver texto.	83
3.9. Ejemplo de ajuste para un canal con la ganancia errónea, pero funcionando correctamente.	86
3.10. Situación final antes del experimento S545 en la campaña de 2021. Histograma de la posición inicial de los picos de la fuente de cobalto (1173.2 en rojo, 1332.5 en azul (ver texto).	87
A.1. ejemplo de una tabla de posiciones y ajustes de picos para $\Delta V = 0V$	96

Glosario

ADC

Siglas de **A**nalog-**D**igital **C**onverter, conversor analógico-digital. Circuito electrónico (normalmente en forma de electrónica integrada) que convierte una señal analógica de voltaje en un número binario proporcional a su magnitud. En física nuclear se suele asociar estos conversores a conversores de pico, en los que, gracias a un circuito adicional, la conversión se realiza sobre el máximo de la señal en una ventana de tiempo determinada

Addback

Procedimiento para recuperar la energía total de una partícula en detectores segmentados, consistente en sumar las contribuciones de detectores contiguos en los que la partícula ha depositado su energía. Esta técnica es especialmente necesaria para la detección de radiación gamma, ya que, a diferencia de las partículas cargadas, tras una interacción Compton cualquier ángulo es igualmente probable (excluyendo efecto Doppler relativista)

Ajax

Siglas de *Asynchronous Javascript and XML*: técnica mediante la cual una página web establece una comunicación con un servidor de manera independiente de la carga de la página web o la interacción con el usuario

APD

Siglas de **L**arge **A**rea **A**valanche **P**hoto **D**iode, Fotodiodo de avalancha de gran área. Detectores de estado sólido consistentes en una unión P-N polarizada en inversa, trabajando en la región lineal. Proporcionan una señal amplificada de cualquier partícula o radiación ionizante que atraviese su región libre de carga. Son particularmente atractivos por su bajo precio frente al área de detección, pero presentan el inconveniente de una fuerte dependencia con la temperatura

Bias Scan

Barrido de voltaje aplicado a todos los detectores de CALIFA para conocer su curva Voltaje-Ganancia y posteriormente poder calibrar y asignar el rango dinámico de cada uno de los detectores.

Bps

Siglas de “**bits per second**”. Número de bits transmitidos por segundo. Nótese que hace referencia al número de bits de la información transmitida, sin tener en cuenta otros bits que pueden acompañar al mensaje, como paridad y otros códigos de redundancia, o señalización del canal (por el contrario, el término *Baudios* hace referencia al número total de bits transmitidos por unidad de tiempo, incluyendo estas señales extras).

Califactl

Aplicación en la forma de un lenguaje reducido, que permite colocar con mucha flexibilidad los parámetros deseados en grupos de cristales de CALIFA, usando una sintaxis sencilla y nomenclatura creada para referir grupos y rangos de cristales (ver capítulo 2).

Daisy-chain

Topología de un bus de control, en el que cada módulo presenta una entrada y una salida, encadenándose varios módulos mediante un cable desde la salida de un módulo al siguiente, tantas veces como módulos haya, menos 1. El conector del último módulo es habitual colocar una impedancia similar a la del cable, para evitar reflejos de señales.

Demonstrator

Estructura hexagonal con capacidad de hasta 6 pétalos (cajas con grupos de hasta 180 cristales) que fue el banco de pruebas previo a la construcción mecánica del detector completo (con carcasa exterior y grúa).

Endcap

Zona frontal de CALIFA, de 7° a 42° , donde se registran la mayoría de eventos en reacciones relativistas. Está compuesto por dos tipos de detectores: CEPA y iPhos (ver sección 1.4.2).

EPICS

Plataforma estándar de control de procesos. Proporciona un sistema unificador para un número diferente de controladores que actualizan una base de datos.

FAIR

Siglas de **F**acility **A**ntiproton and **I**on **R**esearch. Aplicación de la instalación GSI, dedicada al estudio de núcleos exóticos.

FPGA

Acrónimo de **F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray. Circuito integrado de alta densidad que proporciona un gran número de puertas lógicas junto con una red de conexión configurable mediante software. Las FPGAs pueden ser programadas para modelar una gran variedad de circuitos digitales.

GLAD

Imán separador superconductor situado inmediatamente detrás de CALIFA. Se encarga de deflectar los productos de la reacción de forma que a partir del ángulo de deflexión y el tiempo de vuelo, otros detectores puedan averiguar su energía y tipo.

Go4

Programa de visualización y análisis on-line de datos [aut21].

GUI

Siglas de “**G**raphical **U**ser **I**nterface”. Interfaz de usuario (aplicación) gráfica en la que la interacción ocurre principalmente mediante gestos con el ratón en vez de a través del teclado.

HTML

Siglas de “**H**ypertext **M**arkup **L**anguage”. Lenguaje de etiquetas con el que se describen las páginas web.

ICC

Siglas de “***I**ntermediate **C**ontrol **C**omputer*”. Cada uno de los dos ordenadores (uno por cada mitad) que están físicamente próximos a CALIFA y que contienen los controladores directos de los preamplificadores. Estas computadoras son controladas, a su vez por el MCC (***M**ain **C**ontrol **C**omputer*) que contiene los programas de control de alto nivel.

IOC

Siglas de **I**nput **O**utput **C**ontroller, controlador de entrada/salida. Cada uno de los programas que controlan los detectores en la plataforma epics. Constituyen la capa inferior de la arquitectura y son los responsables de aislar las particularidades de cada detector, manteniendo actualizada la base de datos central con los valores recogidos y respondiendo a los comandos.

IPhos

Siglas de **I**ntrinsic **P**hoswich. Técnica que permite, leyendo la señal completa de un centelleador de CsI, estimar la energía y el tipo de partícula, incluso cuando

el centelleador no es suficientemente grueso como para parar completamente la partícula.

Landgw01

Ordenador principal encargado del control de parámetros. Esta conectado a internet, y a la red interna de adquisición, siendo el único puente entre las dos. En el se encuentran los programas principales de control.

Lemo1

Cable de la empresa alemana LEMO GmbH, usado extensamente en física nuclear y de altas energías. Transmite señales de alta frecuencia (hasta 10 GHz) y posee una impedancia lineal de $50\Omega/m$. El nombre *Lemo1* hace referencia a un cable coaxial de 1 alma.

List-mode

Método de almacenamiento de los datos de un experimento basado en sucesos, en el que se graba información de cada suceso individual. Usado en contraposición con *histrogram mode* en el que, durante la adquisición se generan los histogramas de los valores estudiados.

Ixir123

Ordenador principal de adquisición para CALIFA.

MEMS

Librerías de EPICS para la construcción de interfaces gráficas de usuario (aplicaciones de ventana).

Messel

Nombre dado a la mitad izquierda del detector, visto en la dirección del haz (la elección de los nombres se hizo en base al pueblo mas cercano a cada mitad).

Mesytec

Compañía alemana fabricante de electrónica para física nuclear. Proveedor de los módulos preamplificadores para CALIFA [GMB]

Mu-metal

Aleación de Hierro y níquel (77/16 %) con cobre y cromo, que posee una permeabilidad magnética muy alta y es usado para apantallar elementos sensibles frente a campos magnéticos estáticos o de baja frecuencia (su alta resistividad lo hace inadecuado para radiofrecuencia).

NIM

Estándar para módulos electrónicos de física nuclear. El estándar NIM define las características mecánicas y de alimentación de módulos que pueden ser agrupados para reconfigurar la electrónica de un experimento. Adicionalmente define un estándar de señales lógicas para la comunicación entre los módulos

Nomenclatura de control

Forma de referir a un cristal y su canal de adquisición utilizada en todos los programas de control. Es diferente a la *nomenclatura de adquisición*, debido al diferente orden y disposición de los cables y conectores en los buses de adquisición y control.

Offline

Abreviatura de *offline analysis*. Análisis de datos realizado de forma posterior al experimento, en contraposición con *online analysis*, realizado durante el experimento.

Offspill

En experimentos con haces pulsados, periodo dentro de un pulso del haz, en el que no se reciben partículas.

Online analysis

Análisis inicial de los datos adquiridos, realizado durante el periodo de desarrollo del experimento. Estrictamente hablando, es un análisis que se hace sobre el flujo de datos que se está almacenando, y por tanto, los resultados son inmediatos. En la práctica muchas veces se realiza sobre el fichero de datos recién adquirido, con lo que los resultados están retrasados desde minutos a pocas horas. Su objetivo es permitir configurar el detector para el objetivo del experimento y proporcionar una comprobación general de que se están recogiendo los datos correctos.

Overflow

Condición durante la conversión analógico-digital de una señal, en la que el voltaje es superior a lo que puede manejar el conversor analógico-digital

PEXOR

Cada una de las FPGAs que constituyen parte de la cadena de adquisición. Su misión es digitalizar la señal y realizar el análisis de forma de pulso para determinar el tipo de partícula. Son centrales en la operación de CALIFA puesto que permiten extender el rango dinámico de los Conversores analógico-digital. Ante una señal moderada, registran el valor de pico, mientras que

para señales mayores, utilizan la técnica de *tiempo sobre umbral* (*time over threshold*), para determinar la energía inicial

Phoswich

Detectores compuestos de dos centelleadores (en este caso, $LaBr_3$, $LaCl_3$) dispuestos uno detrás del otro. Las partículas con demasiada energía como para ser completamente detenidas en el detector, depositan diferente energía en cada uno de ellos, y puesto que presentan tiempo de decaimiento diferente, se puede separar sus contribuciones y de ahí averiguar la energía inicial de la partícula (ver sección 1.4.2)

Polling

Técnica para seguir el cambio de cualquier variable, realizando lecturas periódicas.

PSA

Siglas de **P**ulse **S**hape **A**nalysis. Técnica que, mediante la digitalización de toda la señal de un detector (y no solamente el valor su pico), permite averiguar información adicional, (como tipo de partícula o lugar de interacción), o reconstruir la energía de la partícula a partir de una traza en un material que no llega a detenerla.

R3B

Dispositivo experimental en la instalación Fair/GSI para el estudio de reacciones de alta energía con isótopos exóticos. Consta de un calorímetro rodeando a un blanco, un imán separador de gran aceptación, un detector de neutrones, y varios trazadores de fibras que pueden ser configurados para adecuarse al objetivo experimental

Read-back

En un sistema de control, capacidad para poder leer el valor del parámetro para el que se ha asignado un valor, ya que por varias razones (errores, tiempos de subida/bajada), este puede diferir del asignado.

ROOT

Conjunto de librerías en C++ para el tratamiento de datos estadísticos, especialmente datos agrupados en sucesos y su visualización. Es el estándar para el análisis de datos en física nuclear y de altas energías, y ampliamente usado en grandes instalaciones. Ha sido diseñado originalmente para los experimentos de altas energías del CERN [col].

SFP

Cada uno de los cuatro bastidores (ing. “*crates*”) que albergan cada uno 16 tarjetas digitalizadoras para CALIFA. Son nombrados SFP0, SFP1, SFP2, SFP3. SFP1 y SFP2 contienen, además electrónica para la conversión de señales provenientes de los detectores phoswich, con lo que, además de la digitalización de pico, tienen la capacidad de medir señales mayores, mediante el método *tiempo-sobre-umbral* (ing. “time-over-threshold”).

SFRS

Siglas de **S**uper **F**ragment **S**eparator, super separador de fragmentos. Separador de isótopos según A y Z, utilizando consecutivamente, un campo magnético (que selecciona por rigidez magnética A/Z), un degradador, que afecta de diferente forma según Z, y un segundo campo que vuelve a separar según A/Z. El uso del degradador y el segundo imán permite separar diferentes núcleos con la misma rigidez magnética, aprovechando que la pérdida de energía en el segundo tramo, proporcional a Z, hace que partículas que tenían la misma rigidez magnética puedan ser separadas por el tercer campo magnético.

SIS18

Nombre del anillo acelerador principal de GSI. En la futura instalación GSI-FAIR, servirá como anillo acelerador previo al SIS100.

Tmux

Programa similar a **screen** que permite ejecutar procesos de forma que, aunque se cierre la ventana de la consola de comandos, estos sigan ejecutándose de fondo. **tmux** tiene la característica de visualizar varios procesos en una sola ventana, y de permitir la comunicación entre esos procesos, así como simular la pulsación de teclas para cada uno de ellos. Esta característica ha sido utilizada para poder llevar a cabo el ajuste de ganancia (ver capítulo 3).

Trazador

Detector segmentado (en el caso de CALIFA, de estado sólido) cuya misión no es recoger la energía de las partículas si no registrar con la mejor precisión disponible su posición, para poder determinar su trayectoria con ayuda de otros detectores.

Umbral

Nivel de intensidad de una señal, por debajo del cual no es procesada. En la práctica. hay dos umbrales diferentes en una cadena de adquisición: el umbral de los amplificadores, valor por debajo del cual no se genera una señal de disparo (*trigger*) y el umbral de los conversores analógico-digital (ADCs), que

es el valor de señal por debajo del cual se considera ruido y no se convierte y almacena el dato.

Underflow

Situación durante la conversión analógico-digital, en la que señal siendo digitalizada es menor que el mínimo valor digital posible. Algunos conversores reservan un valor digital especial para este extremo.

Unpacker

Conjunto de programas que convierten los datos desde el formato de adquisición, que varía según los sistemas utilizados, a un formato común, en este caso ROOT [col], para poder ser analizados con facilidad.

Wixhausen

Nombre dado a la mitad derecha del detector CALIFA visto como el haz. La elección de los nombres se hizo en base al pueblo mas cercano a cada mitad

XMLRPC

Siglas de XML Remote Procedure Call. Protocolo para implementar una arquitectura cliente servidor (esto es, un cliente pide unos datos que el servidor proporciona), a través de internet. Para eso el servidor actúa como un simple servidor HTTP, igual que haría para una página web, con la diferencia de que las peticiones, en vez de ser de páginas web, contienen codificada la función a la que se desea llamar en el ordenador remoto, junto con los parámetros. El servidor, entonces, devuelve una página ficticia en XML que contiene la respuesta, que puede ser cualquiera de los tipos habituales (entero, coma flotante, objeto, cadena, etc).

XtalBall

Detector de centelleo, compuesto por 192 cristales de CsI, dispuestos en una geometría esférica. Es el predecesor de CALIFA en el antiguo dispositivo experimental land.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivo de este trabajo

El objetivo de este trabajo de fin de máster es el desarrollo del sistema de control de parámetros de un detector complejo, CALIFA, parte del experimento R3B en la instalación FAIR/GSI.

GSI es una instalación de física nuclear situada en Darmstadt (Alemania), dedicada a la producción de núcleos exóticos. Durante los últimos años, he tomado parte en la construcción y puesta a punto del detector CALIFA y he estado encargado del desarrollo de un sistema de control para ese detector. Durante las estancias en febrero y marzo de 2021, he tomado parte activa en el montaje y operación del detector, encargándome también del ajuste de ganancia del mismo.

En esta memoria se mostrará el funcionamiento del detector, el proceso de desarrollo del sistema de control, su resultado, y el proceso de ajuste de ganancia, de los que he sido responsable, y que son necesarios para el desarrollo de la campañas experimentales en curso.

Adicionalmente, estoy involucrado en la sección de ingeniería del experimento, habiendo diseñado el prototipo de soporte-grúa para CALIFA y el soporte para el

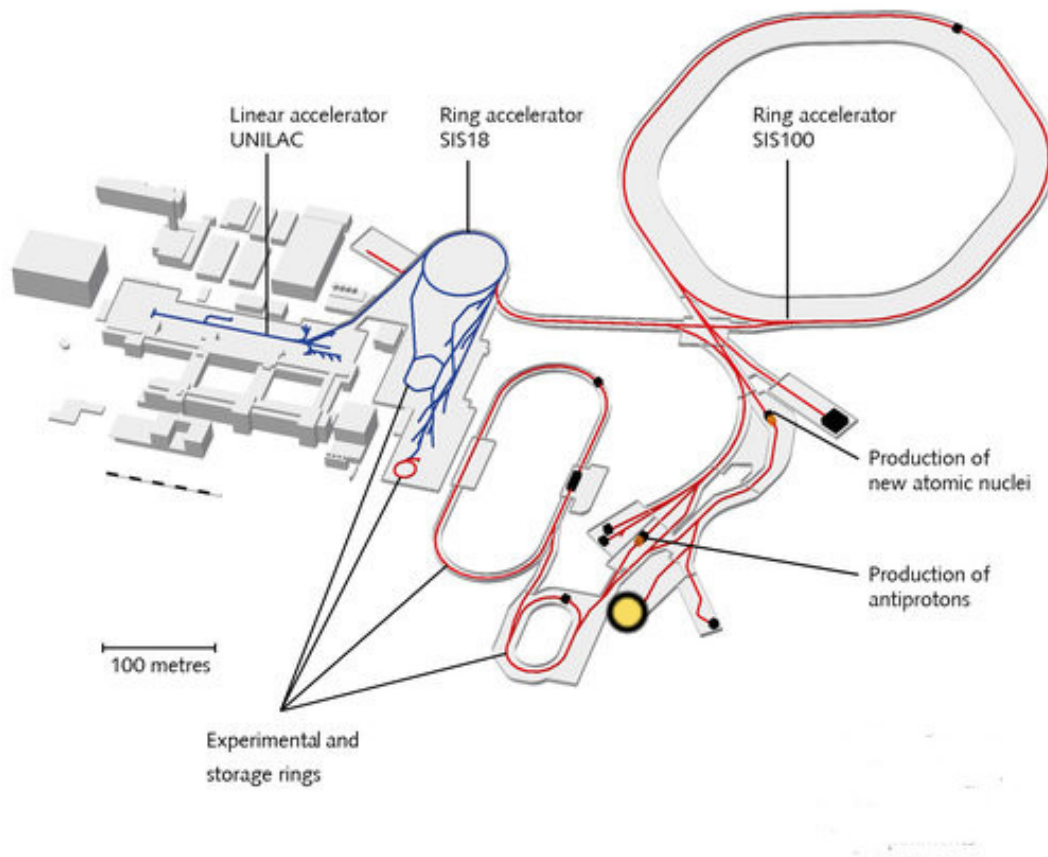


Figura 1.1: Esquema de la instalación GSI/FAIR. En azul, las instalaciones existentes (GSI); en rojo, la ampliación FAIR. El punto amarillo indica la situación del experimento R3B

blanco principal, actualmente en operación.

1.2. La instalación FAIR

FAIR (siglas de **F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch) es una ampliación de las instalaciones existentes en GSI. GSI es una instalación de aceleración de iones pesados para el estudio de la física nuclear, situada en Darmstadt, Alemania (GSI son las siglas de **G**esellschaft für **S**chwerionen **F**orschung, sociedad para investigación con iones pesados)

La instalación FAIR consta de una fuente de iones, un acelerador lineal inicial, y un sincrotrón (SIS18, el existente actualmente) que alimenta otro nuevo anillo acelerador (SIS100) de hasta 20 AGeV, aún por construir. Tras una aceleración previa hasta 1 AGeV, el haz se hace impactar contra un blanco primario de grafito, y los productos de reacción entran en un separador (llamado SFRS (Super-FRS, siglas

de super **F**ragment **R**eaction **S**eparator)), que selecciona los productos deseados de la reacción.

Este nuevo separador, colocado después del SIS100, se basa en el mismo método de separación B- ΔE -B (método por el que se separan los productos en tres etapas). Primero un campo magnético separa por cociente A/Z: este método no logra separar productos con la misma rigidez magnética pero diferente masa. Para ello, pasan a continuación por un degradador, en forma de lámina fina de algún material, que origina una pérdida de energía dependiente de la carga, de forma que una tercera etapa de separación magnética puede resolver aquellos fragmentos que partían con la misma rigidez magnética. El SFRS es una ampliación del FRS, y aunque amplía escasamente la rigidez magnética del anterior ($B\rho$ de 18 T*m a 20), duplica la aceptación angular de los productos de reacción de forma que para una reacción clásica de espalación (^{238}U en grafito), como resultado de estas mejoras, la transmisión total a la línea de alta energía se multiplica por 10 con respecto al separador actual. [groa]

Tras el SFRS se encuentran varios anillos de almacenamiento y líneas de distribución a las zonas experimentales. Entre el programa de física, se encuentra el estudio de la estructura nuclear mediante reacciones (R3B, del cual trata este trabajo), física de antiprotones e hipernúcleos, entre otros.

Es importante reseñar que si bien todo R3B se ha diseñado como parte integral de FAIR y dimensionado para aprovechar las capacidades del SFRS, hasta la fecha, debido a que FAIR está aún en construcción y ni el SIS100 ni el SFRS están construidos aún, los experimentos, desde 2018, han sido realizados en la zona experimental del acelerador antiguo (SIS18), usando el antiguo separador, FRS.

1.3. El experimento R3B

El dispositivo experimental R3B (siglas de **R**eactions with **R**adioactive **R**elativistic **B**eams), se encuentra en la rama de alta energía tras SFRS, y está concebido como un dispositivo experimental genérico para investigar reacciones nucleares con haces relativistas (de alta energía, hasta 1AGeV) con alta eficiencia y resolución, de forma que se pueda realizar la medida completa de la cinemática y espectroscopía de los productos de la reacción. Gracias a la alta energía de los haces en FAIR y la posibilidad de producir haces de núcleos exóticos, el estudio de reacciones en estos núcleos permitirá avanzar y entender mejor las regiones muy lejos del valle de estabilidad. Las altas energías favorecen el estudio de la estructura nuclear y reacciones por varias razones: la producción y separación es mas fácil debido a mayor proyección frontal de los productos en el blanco de espalación. Los iones salen completamente

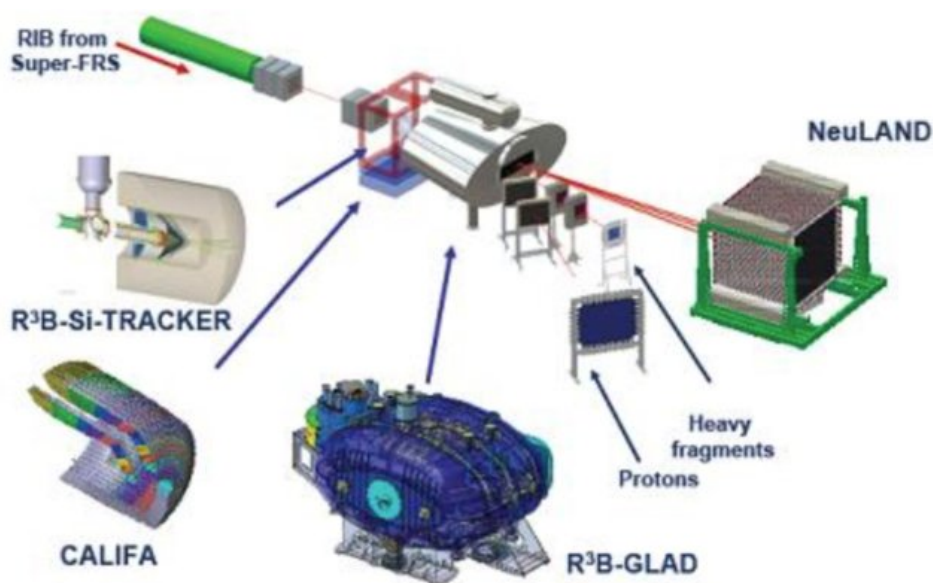


Figura 1.2: Disposición del experimento R3B

ionizados, lo que garantiza haces de mayor pureza en la zona experimental. Finalmente, muchas de las reacciones estudiadas se conocen teóricamente mejor a altas energías, porque se simplifica el proceso, y se limitan los canales principales. Altas energías implican también, la posibilidad de usar blancos mas gruesos en la zona experimental y, por tanto, acceder al estudio de reacciones con secciones eficaces menores.

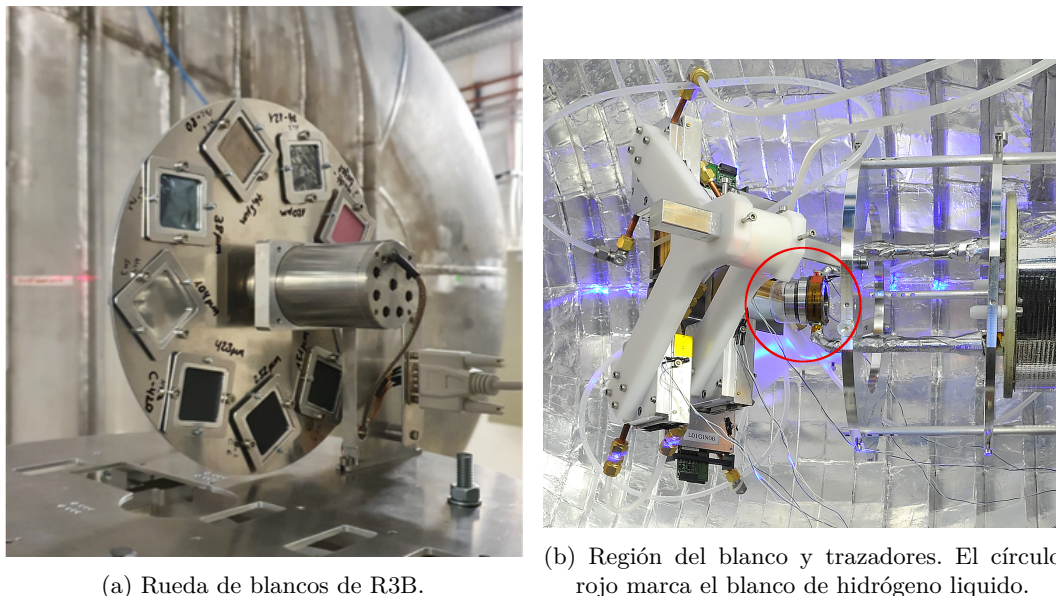
Para llevar a cabo estos estudios, se ha construido un dispositivo experimental muy flexible, con varios detectores intercambiables y configurables alrededor de un blanco, un calorímetro y un imán separador, cuya disposición puede verse en la siguiente figura (1.2):

1.3.1. Zona del blanco

El blanco del experimento R3B¹ está situado en plano focal de la rama de alta energía del separador SFRS [groa]. Puede contener una rueda con blancos sólidos intercambiables, de hasta 5 y 6 g/cm^2 , típicamente grafito (usado a menudo como referencia), plásticos con alto contenido en H, y Pb, o un blanco de hidrógeno líquido de 6x2x2 cm, adecuado para reacciones con cinemática inversa.

¹Este blanco es distinto al blanco de espalación mediante el cual se producen los núcleos exóticos. Lo correcto es hablar de blanco primario y secundario, puesto que no todos los experimentos requieren de un blanco para investigar los productos de reacción, pero por comodidad, se aísla el experimento de la producción, y se habla de “blanco”, en vez de “blanco secundario”.

El objetivo de R3B es registrar la energía y trayectoria de todas las partículas producidas en una reacción. Debido a las energías involucradas y a causa de la baja sección eficaz de algunos procesos estudiados, entre otras razones, el blanco tiene un tamaño no despreciable frente a la posición de los detectores: es por eso necesario colocar un dispositivo *Trazador* (*tracker*), rodeando inmediatamente al blanco, en forma de un detector de silicio altamente segmentado para recoger las posiciones iniciales de las partículas emergentes de las reacciones.



(a) Rueda de blancos de R3B.

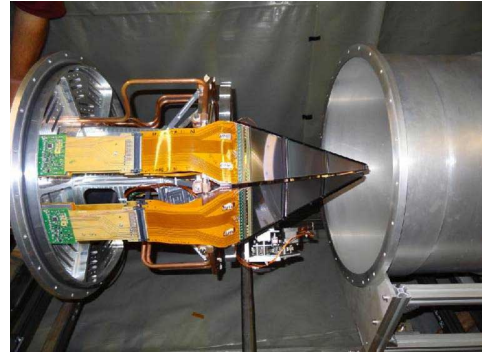
(b) Región del blanco y trazadores. El círculo rojo marca el blanco de hidrógeno líquido.

Figura 1.3: tipos de blancos en R3B

Este detector está optimizado (espesor, electrónica y segmentación) para recoger únicamente la posición de la partícula, presentando una resolución en energía muy baja. El trazador diseñado para R3B tiene forma de pirámide de 8 lados, de forma que cubre todos los ángulos polares de 0° a 143.2° , pero, debido a problemas con la electrónica del front-end, su construcción está retrasada, utilizándose en su lugar durante la primera fase de construcción, (llamada *fase 0*), detectores de silicio genéricos con ángulo de cobertura y segmentaciones mucho menores y con la electrónica fuera de la cámara. De cualquier manera, a día de hoy, estos detectores proporcionan el punto inicial para determinar las trayectorias, y participan en la generación de la señal de disparo (*trigger*) principal para aquellos experimentos que lo requieran [al16].



(a) Trazador actual, provisional, usando detectores genéricos.



(b) Trazador definitivo (visibles solo 2 lados de la pirámide).

Figura 1.4: detectores de trazas actual y futuro para R3B

Rodeando al detector de trazas, se encuentra CALIFA, un detector segmentado de centelleo, cuyo control es objeto de este trabajo, y que será descrito con mas detalle en una próxima sección (ver 1.4). Sucintamente, su cometido es registrar la posición y energía de todas las partículas (protones hasta 300 MeV) y radiación gamma (hasta 30MeV), emergentes de las reacciones, con ángulos comprendidos entre 7° y 143.2° ², con una eficiencia geométrica muy alta ($>98\%$) y buena resolución en energía ($<6\%$ FWHM/E).

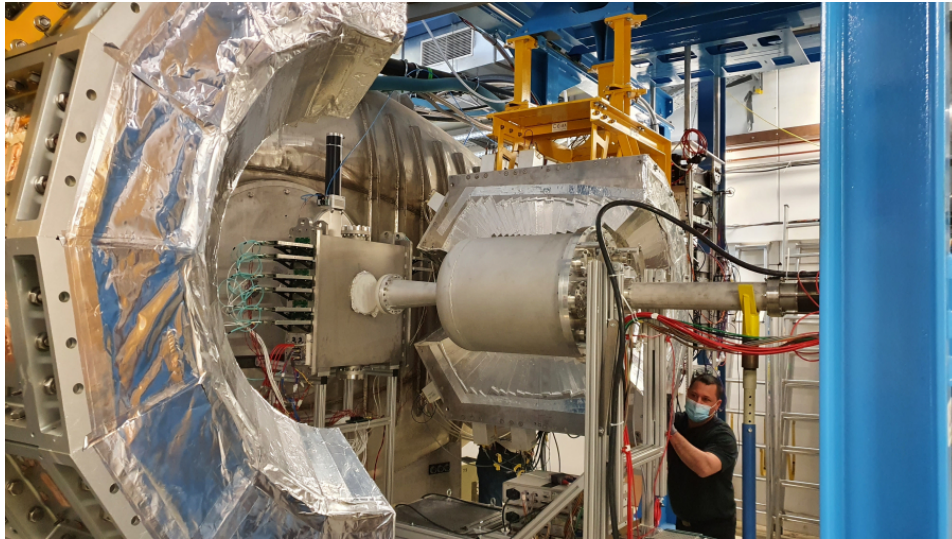


Figura 1.5: CALIFA en su estado actual, abierto para permitir el acceso a la cámara de reacción (en el centro)

²El límite superior es inferior en la etapa de diseño y construcción actual, estando cercano a 90° .

1.3.2. GLAD

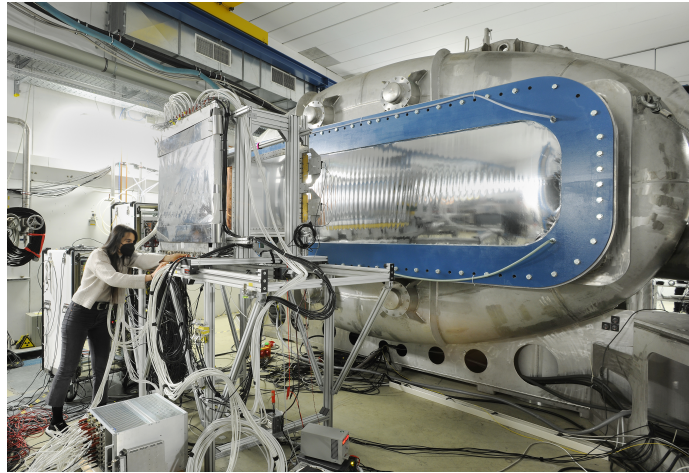
En una reacción a energías relativistas, todas aquellas partículas y fragmentos pesados, además de la mayoría de los neutrones (producto de reacciones de evaporación de los núcleos producto), salen con ángulos polares muy bajos, menores de 7° , y por tanto, escapan de la detección de CALIFA. El dipolo GLAD, situado a continuación, genera un campo magnético que permite separar fragmentos, protones, y neutrones, con una rigidez magnética suficiente para que puedan ser separados espacialmente y analizados por diferentes detectores posteriores, determinando su masa según el ángulo de dispersión y utilizando el tiempo de vuelo para la determinación de la energía. GLAD es un imán superconductor refrigerado con helio líquido, carece de armadura ferromagnética, y genera un campo de hasta $5 \text{ T}\cdot\text{m}$ en todo su volumen interior. Es capaz de deflectar hasta 18° haces de elementos pesados acelerados hasta 1 GeV/nucleón , comparable con la máxima rigidez magnética del separador de FAIR³. [Gas+08].

1.3.3. Detectores de fibras y de tiempo de vuelo

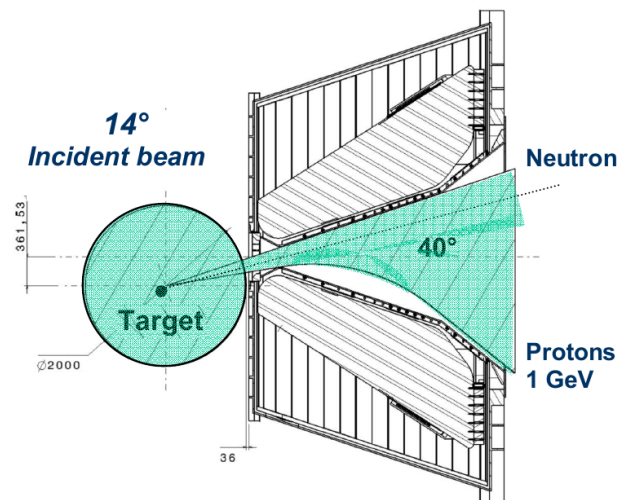
Las partículas cargadas que defleca GLAD (fragmentos y protones), son analizados por una combinación de dos tipos de detectores:

Los detectores de fibras son capas de fibras centelleadoras de 0.1mm de espesor cada una, que determinan la posición de una partícula. El diseño de R3B requiere una resolución en carga $\Delta Z/Z < 0,5\%$ y una determinación del momento $\Delta P/P < 10^3$, cuyo caso límite constituye la separación de núcleos alrededor de $A=200$ (U). Para ello se requiere una precisión de 0.1mm a 5m de distancia.

³Es decir, puede desviar en 18 grados los productos mas energéticos que puede separar SFRS.



(a) Vista posterior de GLAD.



(b) Sección horizontal, mostrando trayectorias de neutrones y fragmentos cargados.

Figura 1.6: Detalle del imán superconductor GLAD.

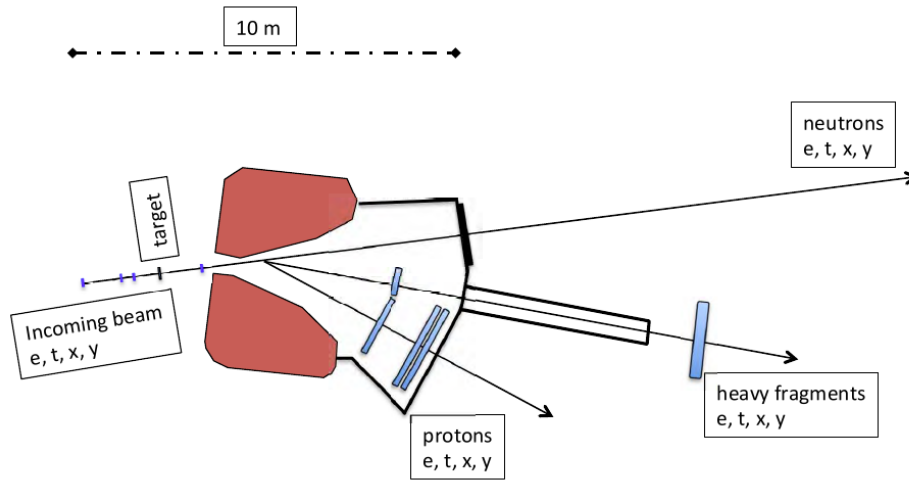
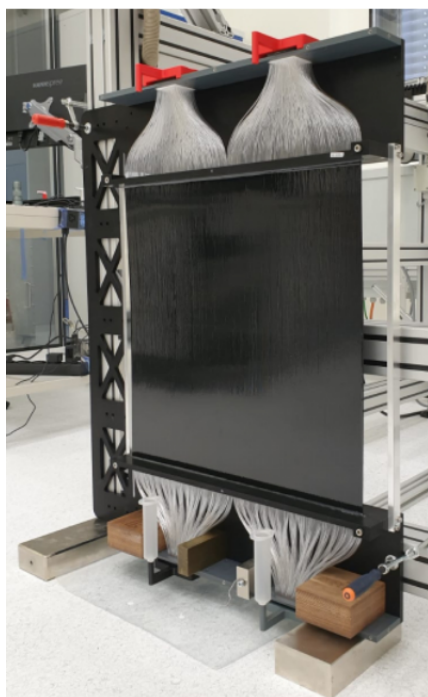


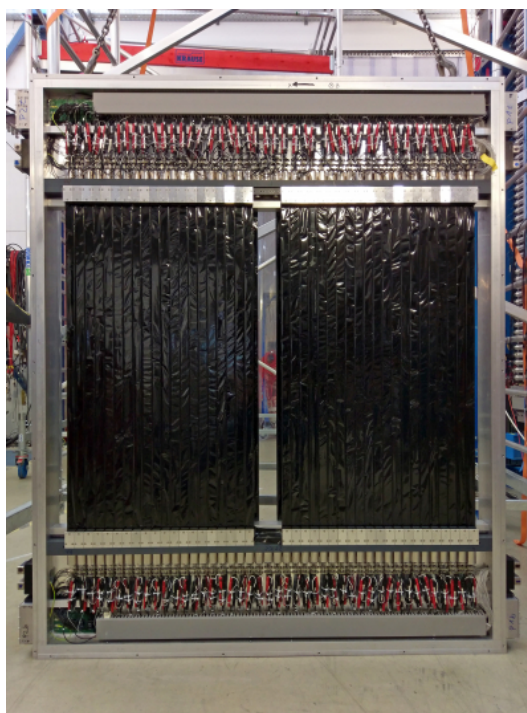
Figura 1.7: Esquema de la determinación del momento y masa de partículas cargadas en R3B.

Existen varios detectores de fibras, tanto directamente a la salida del imán como a 5 y 10m de distancia. Su cometido es complementar la determinación de trayectorias. Estos detectores son móviles y su configuración se adapta a las necesidades del experimento.

La determinación de la energía de los fragmentos cargados se realiza con una pared de plásticos centelleadores (ver figura 1.8b) situada a 10m del imán. Para la precisión requerida en la determinación del momento requiere una precisión en la medida del tiempo de vuelo de $20ps$ o menos.



(a) Detectores de fibras de R3B.

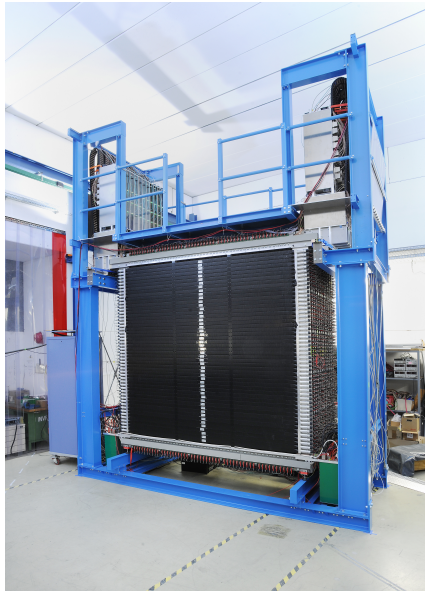


(b) Aspecto del detector de tiempo de vuelo para la determinación del momento de partículas cargadas en R3B.

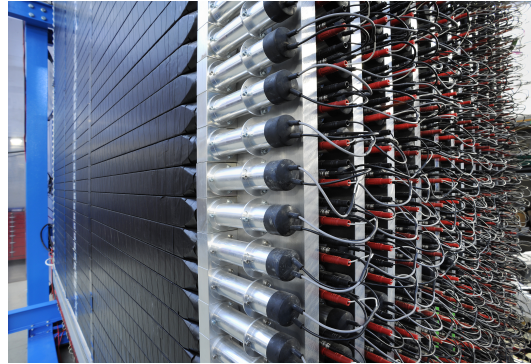
Figura 1.8: Detectores de fibras y pared de tiempo de vuelo (*ToF wall*), para la medida de energía.

1.3.4. Neuland

Los neutrones, que no son afectados por el campo magnético y por lo tanto, no resultan deflectados, continúan hasta el detector Neuland (**New Large-Area Neutron Detector**)), situado en la dirección del haz. Neuland es un detector de centelleo para neutrones, segmentado, y con varios planos de detección redundantes. Su eficiencia es del 90 % para sucesos con un solo neutrón, y del 60 % para multiplicidad 4. El detector está compuesto por múltiples (60) subdetectores paralelos apilados (llamados planos) formados a su vez por barras de plástico centelleador, dispuestas paralelamente. Cada plano mide 2.5x2.5 m, y consta de (50) barras (de 5x5x250cm cada una). Cada barra centelleadora dispone de dos fotomultiplicadores situados a ambos extremos que permiten determinar la posición de interacción del neutrón a partir de la diferencia de tiempo y cantidad de luz recogida por cada uno. Ya que la determinación precisa ocurre solo para una coordenada, los planos van alternando la disposición horizontal y vertical de las barras (formando unidades llamadas dobles planos).



(a) Aspecto general.



(b) Detalle de los planos alternados, con los fotomultiplicadores visibles en un extremo de los planos impares.

Figura 1.9: El detector Neuland.

1.4. El calorímetro CALIFA

Dentro del experimento R3B, el detector CALIFA (**C**alorimeter for **I**n-flight **A**nalysis), tiene el cometido de detectar los protones y rayos gamma (producto de la reacción estudiada) que emergen del blanco con ángulos polares entre 7° y 140° .

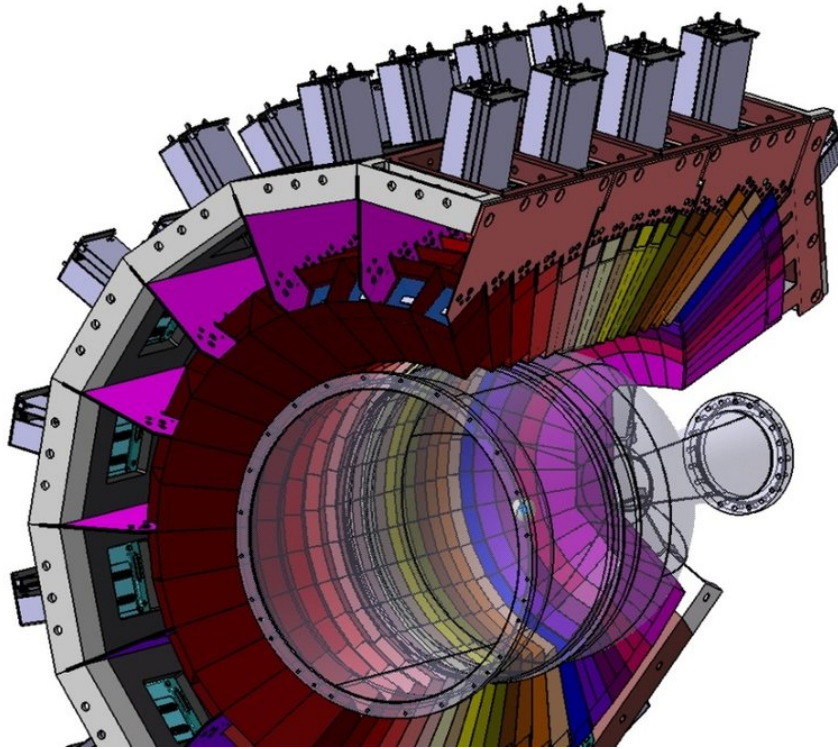


Figura 1.10: Corte de CALIFA, visto desde detrás. Se puede apreciar la cámara de reacción con la posición del blanco. Los cristales centelleadores están coloreados en tonos rojo-hasta violeta, mientras que en el exterior se pueden apreciar los módulos preamplificadores.

Debido a la energía del haz y a las energías relativistas a las que ocurre la reacción, potenciado por el boost de Lorentz, todas las partículas con masa mayor que la de los protones emergen con ángulos muy pequeños en el sistema de laboratorio, y abandonan CALIFA por el frente, y como se ha explicado, son analizados en otros detectores del sistema experimental. Únicamente los protones, debido a su pequeña masa, y la radiación gamma, emergen con ángulos mayores de 7° , dentro de la región de detección del calorímetro.

El objetivo de este detector consiste, por tanto, en la determinación de la energía y la dirección y la identificación del tipo de partícula (protón ó gamma). Estas determinación no es tan sencilla como a primera vista se podría pensar, por las siguientes razones:

- La determinación de la dirección de los productos de la reacción necesita al menos *dos* puntos para poder determinar el punto de origen. Esto es necesario porque gracias a la energía del haz (hasta 700 GeV/A), se pueden elegir blancos gruesos (mayor sección eficaz total), de forma que el blanco tiene

un espesor no despreciable frente al tamaño del detector. Por ejemplo, uno de los varios blancos utilizados en los experimentos, el de carbono, presenta hasta $16g/cm^2$ (aproximadamente 4 cm de espesor), frente al radio interior de CALIFA de 30 cm. Aún mas, en el caso de un blanco de hidrógeno líquido, el blanco presenta unas dimensiones de 6x2x2 cm.

- Durante un único suceso, puede haber varios protones incidiendo sobre el mismo cristal y ha de poderse resolver la contribución en energía de cada uno. El caso de los protones es el mas favorable, puesto que debido a la naturaleza de su interacción, su dirección es aproximadamente radial, pero en el caso de la radiación gamma la situación se complica, puesto que además de la interacción por efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton juega un papel muy importante, y este tipo de interacción dispersa la traza de la partícula por una región amplia del detector: en la práctica totalidad de los casos es necesario sumar las contribuciones Compton en varios cristales cercanos para poder recuperar la energía inicial (este proceso es conocido como *Addback*, y por ahora se realiza únicamente durante el análisis de datos *Offline*).
- El primer punto de la trayectoria es calculado por los trazadores (*trackers*) que rodean al blanco, y necesita una segmentación correspondientemente alta en CALIFA para complementar la traza y determinar el punto de origen. La segmentación también es necesaria para poder resolver varias partículas simultáneamente, y debido a la alta intensidad del haz, ocurrirán varias reacciones en el intervalo de detección, cuyas trazas en el detector habrá que separar y cuantificar.

CALIFA es un detector de centelleo muy segmentado, que usa diferentes cristales y sensores dependiendo de la región angular. Esto viene determinado por los requisitos de funcionamiento.

Dentro del experimento, CALIFA esta pensado para trabajar entre dos situaciones extremas. Para algunas reacciones es deseable que CALIFA funcione como un espectrómetro, detectando con mucha precisión unos pocos gammas de baja energía. En otro tipo de reacciones, sin embargo, con múltiples cascadas de gammas, lo ideal es poder estimar la energía total de la energía gamma, sin importar tanto los valores individuales; es decir, funcionando como calorímetro. Este modo calorimétrico impone, además restricciones serias acerca de la zona muerta total del detector, definida nominalmente como menor del 2%. En la práctica, CALIFA de poder configurarse para trabajar entre estos dos extremos y para eso, los detectores, por tanto deben combinar una alta eficiencia y resolución en energía para gammas, junto con alto poder de frenado para partículas para poder frenar y estimar la energía inicial.

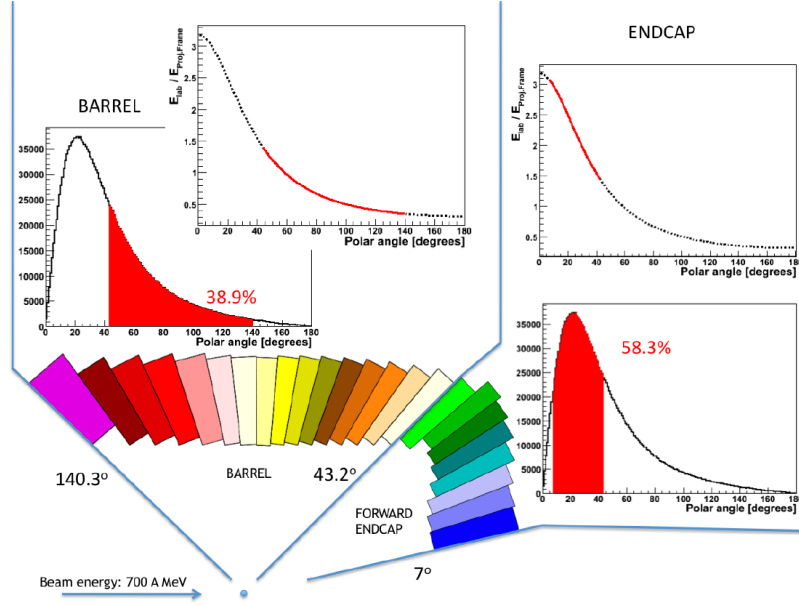


Figura 1.11: Número de partículas con respecto al ángulo polar, para una energía de haz de 700 A MeV.

Debido principalmente al efecto Doppler relativista (boost de Lorentz), y las energías en el sistema de laboratorio (con $\beta = 0,85$, $E_{lab} = 3,2E_{cm}$), La parte frontal recibe la mayor parte de los sucesos y, además aquellos con más energía. Las longitudes de centelleadores necesarias para poder frenar completamente las partículas, aún para aquellos con mas poder de frenado, son prohibitivas, tanto en tamaño (dada la proximidad del imán separador GLAD) como en coste. Se usan, por tanto, técnicas de análisis de señal para reconstruir la energía total de las partículas, aún sin llegar a detenerlas dentro del volumen activo del detector (ver 1.4.2)

1.4.1. Zona lateral (*Barrel*)

La zona lateral de CALIFA recibe muchos menos sucesos (38.9%) [groa] y estos son de menor energía. Sin embargo, comprende la mayor parte del área del calorímetro. Por tanto, se ha recurrido a utilizar un material centelleador mas convencional, CsI(Tl) (yoduro de Cesio dopado con Talio), que puede fabricarse a un coste moderado, como cristales suficientemente largos para parar los sucesos mas energéticos en esa zona, sin incrementar tremendamente el coste. La mayor energía que requiere la mayor longitud de cristal sucede, evidentemente, en el límite inferior de ángulo polar, a 43.2° donde se necesitan hasta 22 cm de CsI para parar protones de 300MeV.

El CsI presenta un poder de frenado bajo (en comparación con otras alternativas) pero son baratos (1€/cm3), y fáciles de cortar y manejar. Estos cristales son

algo higroscópicos y a largo plazo pueden volverse opacos en presencia de humedad atmosférica, pero esto se evita manteniendo una atmósfera de N_2 seco dentro del detector (solución que tiene el doble cometido, de mantener CALIFA a una temperatura constante).

El barrel está dividido en 16 anillos con ángulos polares entre 43.2 y 140.3 grados, y cada anillo consta de 64 cristales, con un total de 1952 cristales y un peso total de 1300 kg. Actualmente están instalados 1562 cristales, y se espera completar la cifra durante los próximos 2 años.

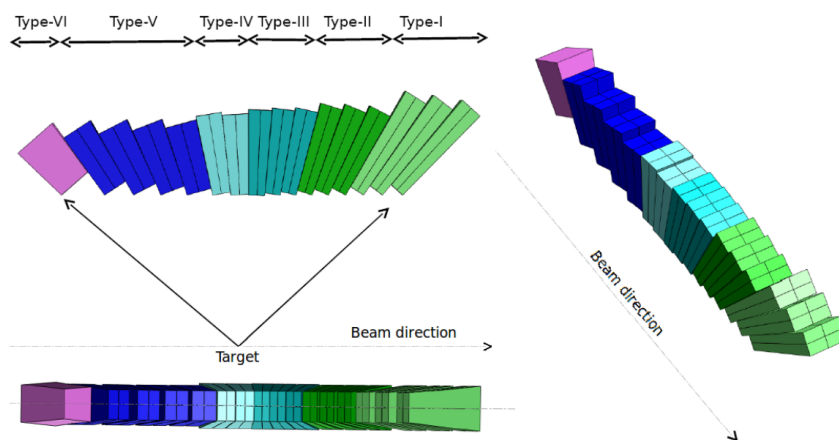


Figura 1.12: Corte azimutal de CALIFA, mostrando la disposición geométrica de los cristales en la zona del barrel.

1.4.2. Región frontal (*Endcap*)

En esta región angular, entre 7° y 43.2° se reciben el 52.9 % de los sucesos originados por gammas y fotones⁴. Las energías son tan altas, que no es posible parar las partículas mas energéticas (protones hasta 700 MeV en laboratorio), así que se recurre a la técnica llamada *Phoswich* [M B15] (siglas de **phosphorescence sandwich**).

Esta técnica se basa en el uso de dos cristales con diferentes parámetros de centelleo (tiempo de decaimiento), y ópticamente compatibles (el segundo debe ser transparente a la luz generada por el primero). Estos cristales se colocan juntos, acoplados axialmente y con un solo sensor recibiendo la luz de ambos.

Estos dos materiales no detienen completamente la partícula, pero la frenan de diferente manera (por su tiempo de desexcitación, y porque el segundo ve una partícula con menos energía que la inicial) de forma que posteriormente, mediante

⁴El 3 % restante está entre 0 y 7° o a mas de 140° .

análisis de la forma del pulso (PSA, *pulse-shape analysis*), se puede determinar cuanta energía ha sido depositada en cada uno de los cristales, y de ahí estimar la energía inicial de la partícula.

Aún así, las altas energías involucradas hacen necesario el uso de materiales con aún mayor poder de frenado, y se ha recurrido al uso de pares Bromuro-Cloruro de Lantano ($LaBr_3/LaCl_3$).

Estos materiales son fuertemente higroscópicos, por lo que tienen que estar encapsulados en aluminio, y no son fácilmente cortados a las formas que se necesitan para adaptarse a la geometría polar del Endcap. La segmentación, por lo tanto, es menor, lo que implica mayor superficie de recolección de luz y complica el uso de detectores APD que con un área máxima es de $2cm^2$, se encuentran al límite del estado del arte de la técnica en cuanto a superficie de detección⁵: el uso de APDs proporcionaría una recolección de luz muy limitada y por tanto una resolución en energía insuficiente. Por estas razones, se ha recurrido a tubos fotomultiplicadores.

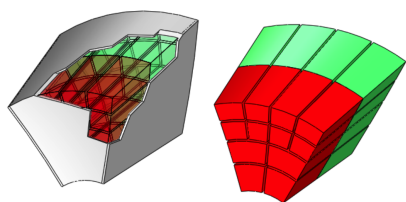


Figura 1.13: Aspecto de un módulo del endcap, con simetría octogonal, mostrando el acoplamiento phoswich de los centelleadores [grob].

Así, a diferencia de lo que ocurre en zona del barrel, en la zona del Endcap se utilizan fototubos como transductores. Paradójicamente, esto coloca los fototubos, que por su naturaleza son sensibles a los campos magnéticos, en el sitio mas cercano al imán GLAD, donde por diseño puede haber campos residuales superiores a 30 mT/m, aunque esta desventaja se puede solucionar mediante un apantallamiento con Mu-metal. No se va a entrar en las particularidades de este acoplamiento, puesto que aunque ya han sido fabricados y están siendo testeados, no han sido incorporados aún al detector.

En la figura 1.14 puede verse un diagrama explicativo del funcionamiento de un acoplamiento phoswich. En la gráfica se visualiza la energía total recogida por el primer centelleador, frente a la suma de los dos centelleadores. En la región (1), la partícula se detiene en el espesor del primer centelleador: $E = E_1$ y resulta en una línea diagonal. La región 2 abarca aquellas energías para las que la partícula tiene suficiente energía para atravesar el primer centelleador (*“punch-through”*), pero queda detenido en el segundo. Con energías crecientes, disminuye el frenado en el primero, por lo que la energía forma una banda diagonal decreciente. En la zona 3, la partícula atraviesa completamente el detector, dejando cada vez menos energía en

⁵Esta era la situación en 2012-2014, durante la etapa de diseño de CALIFA. En ese momento la tecnología de fotomultiplicadores de silicio no estaba aún desarrollada, por lo que no eran una opción.

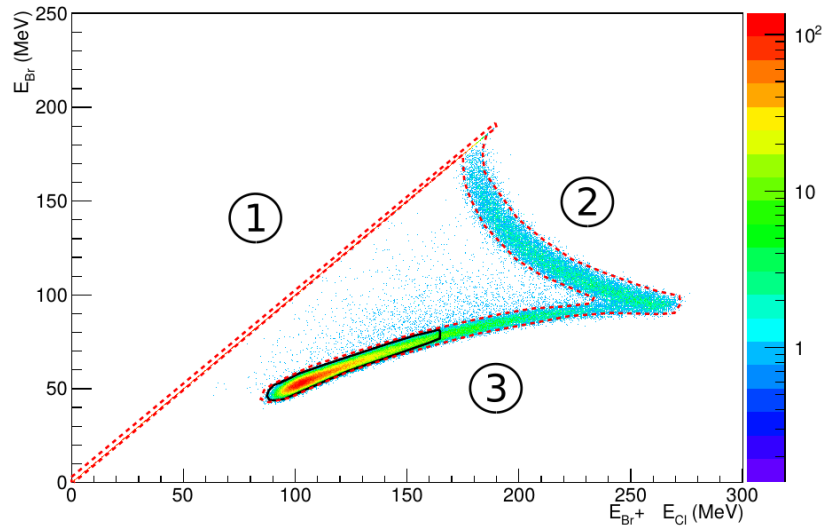


Figura 1.14: Gráfica E_1 vs E_{tot} para un acoplamiento phoswich (ver texto).

ambos centelleadores, por lo que el punto se desplaza hacia abajo y a la izquierda.

1.4.3. IPhos (Intrinsic Phoswich)



Figura 1.15: Aspecto de un cristal centelleador de CsI de la zona del IPhos, con el APD montado.

Para las regiones exteriores de la zona frontal se utiliza otra técnica llamada IPhos (del inglés **I**ntrinsic **Ph**oswich). Un detector IPhos utiliza cristales de yoduro de Cesio (CsI(Tl)) y diodos de avalancha similares a los del barrel, y una digitalización completa de la señal (frente a la digitalización habitual del pico únicamente), para poder determinar la partícula y la energía inicial, aún cuando la longitud del cristal no sea suficiente para parar la partícula y recoger toda su energía [M B15].

El algoritmo se basa en que el centelleo del yoduro de Cesio tiene 2 componentes (llamadas lenta y rápida) de 600 ns y $3.5\text{ }\mu\text{s}$ respectivamente. La proporción entre estas dos componentes depende de la energía y el tipo de la partícula. Esta relación, que no es lineal y es determinada por medio de simulaciones permite, digitalizando

convenientemente la forma de la señal de centelleo y aplicando algoritmos de deconvolución, recuperar la energía inicial [M B15]. Los cristales en la zona de IPhos tienen una longitud de 22cm.

1.5. Los detectores de la zona lateral de CALIFA

Dado el estado actual de construcción de CALIFA, en el que solo están presentes detectores en la zona del barrel y algunos IPhos, en esta memoria se van a describir solamente los detectores acoplados a estos cristales.

Estos detectores son fotodiodos de avalancha de gran área (LAAPD, siglas de **L**arge-**A**rea **A**valanche **P**hotodiode). Dada la necesidad de recolección de luz, se ha realizado un desarrollo conjunto con Hamamatsu para duplicar el área de detección, colocando en paralelo 2 detectores (los de mayor área actualmente en producción) con una única lectura. Los APDs utilizados fueron desarrollados conjuntamente con la empresa suministradora Hamamatsu, a partir del diodo de avalancha S8664-10 [Hama].

Un cristal típico del barrel (en realidad hay 6 tipos diferentes que se acoplan según la posición) presenta una área trasera (en la cara en la que se recoge la luz) de aproximadamente 4cm^2 . Frente a esto, el área de 1cm^2 no era suficiente para recolectar una fracción de luz significativa de los cristales (a menor fracción de luz recogida peor resolución en energía, por la incertidumbre estadística), por lo que se encargó el diseño de paquetes de 2cm^2 con dos detectores en paralelo (emparejados según voltaje de operación) que se leen como una sola unidad (ver figura 1.5).

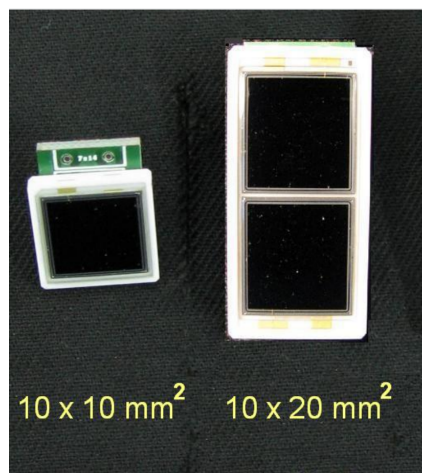


Figura 1.16: Diseño original y solución final para los transductores.

El uso de estos fotodiodos de avalancha, conlleva algunas particularidades, que configuran la cadena de adquisición.

Un detector de semiconductor en la región lineal consiste en una unión P-N polarizada en inversa. En condiciones normales, la barrera de potencial impide el paso de corriente (existe una corriente mínima de fuga (*dark current*) que depende de la temperatura debido a la creación de pares espontáneos de electrón-hueco).

Si una partícula ionizante atraviesa la región libre de carga, libera electrones de capas que estaban aún ligadas (para las cuales el gradiente de voltaje por la polarización no era suficiente para su ionización). Estos electrones se encuentran en ese momento en el campo eléctrico producido por la polarización inversa y se aceleran. En el camino, van chocando con otros átomos y liberando otros electrones. Si el voltaje está por debajo de un umbral (dependiente del material y el dopado), estas cargas libres no son capaces de ionizar a su vez a otros átomos, y la corriente es mínima. Si por el contrario, las condiciones de voltaje/dopado son mucho más favorables, se produce un fenómeno exponencial, en el que cada par electrón-hueco generado ioniza varios átomos en su recorrido hacia la zona P(/N) acabando con una avalancha exponencial que hace conductora a la unión PN en polarización inversa. La corriente cesa únicamente cuando cesa polarización.

En una ventana muy restringida entre estos dos modos de operación, se encuentra la región lineal. En esta región (determinada por la polarización, el dopado y las características geométricas de la unión), la carga liberada es proporcional al número de cargas inicialmente liberadas y, por tanto, a la energía de la partícula incidente. Es en esta región en la que trabajan los fotodiodos de avalancha, que consiguen factores de amplificación en torno a 40⁶.

1.5.1. Dependencia de la ganancia con el voltaje de polarización

En la región lineal, un detector de estado sólido presenta una ganancia mayor cuanto mayor sea el voltaje aplicado. Esto se debe a la mayor aceleración de cualquier carga libre en la zona de depleción. La dinámica de cascada hace que esta dependencia sea exponencial: el límite lo presenta la región de avalancha, donde la respuesta del detector deja de ser lineal con la energía de la partícula incidente. En el caso de los APDs, sin embargo la limitación operativa a la amplificación viene dada antes por la degradación de la señal debido a la corriente de fuga, que crece más rápido que la ganancia, llegando a degradar la señal, de forma que se pierde la resolución en energía. En el límite superior, se llega a la región de avalancha:

⁶CALIFA trabaja por debajo de ese punto óptimo.

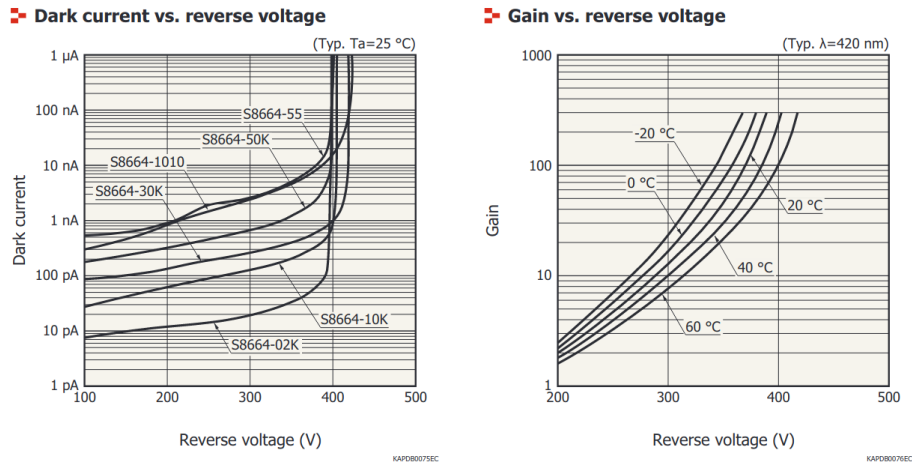


Figura 1.17: Dependencia de la ganancia y la corriente de fuga con respecto al voltaje en inversa [Hamb].

trabajar en esta región daña irreversiblemente al detector, puesto que las fuentes de alimentación no están diseñadas para cortar el voltaje ante una avalancha. La corriente se volvería continua y dañaría el semiconductor.

Debido a estos dos factores opuestos (ganancia frente a corriente de fuga), la resolución presenta un mínimo a un determinado valor del voltaje. Este mínimo es calculado para cada detector y añadido a su hoja de datos (ver 1.18). En CALIFA sin embargo se utiliza un voltaje menor, a costa de una menor amplificación (un factor 20 frente a 40 [groa]) para disminuir la dependencia de la ganancia con el voltaje.

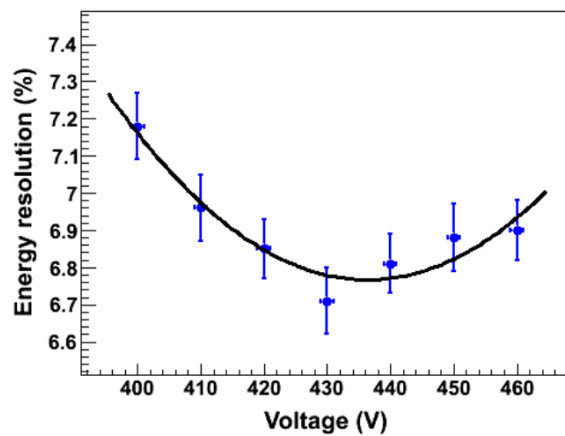


Figura 1.18: Dependencia de la resolución en energía con el voltaje: (medida de una fuente de Cs, fuente: [groa]).

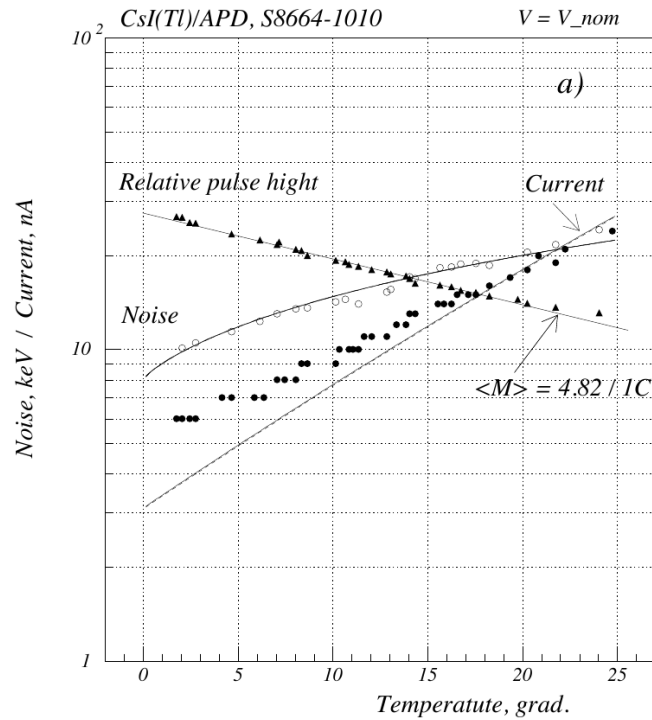


Figura 1.19: Dependencia de la ganancia y la corriente de fuga con respecto a la temperatura [groa].

1.5.2. Dependencia con la temperatura

En la figura 1.17 se observa, además, que la ganancia varía fuertemente con la temperatura.

El uso de un detector de estado sólido en la región lineal, trae consigo una fuerte dependencia de la ganancia y otros parámetros con la temperatura.

Por una parte la corriente de fuga en polarización inversa (dark-current) aumenta con la temperatura, puesto que el número de pares térmicos creados en la zona libre de carga, sigue una dependencia exponencial. Esta corriente continua de base, influye negativamente en la resolución en energía, puesto disminuye la relación señal/ruido.

Por otra parte, la temperatura afecta negativamente al factor de amplificación. La explicación para esta disminución es que el número de fonones en la red cristalina (en esencia, la vibración de la red) es proporcional a la temperatura. Los electrones libres, acelerados pueden chocar con estas partículas virtuales, transfiriendo su momento a la red y perdiendo su capacidad de ionizar otros átomos. Experimentalmente se ha observado una disminución de la ganancia de aproximadamente $-2.8\%/^{\circ}\text{C}$ en el rango entre 22 y 24 $^{\circ}\text{C}$ [groa] (el valor nominal para los APDs utilizados es de

-2.5 %/°C). En un rango mas amplio (0-25 °C) llega a alcanzar valores de -4.82 %/°C.

Con todo esto, la variación de un grado de temperatura da lugar a una variación de 2,3% en altura para un pulso. Puesto que los cristales centelleadores muestran una resolución en energía al límite de lo exigido para CALIFA (entre 5.5 y 7% (FWHM/E), ha habido que hacer un cribado y rechazar aquellos cristales que no cumplieran las condiciones requeridas), es necesario mantener las fluctuaciones en la temperatura por debajo de ese rango.

CALIFA cuenta con 2 sistemas complementarios para evitar la deriva de las ganancias con la temperatura. Por una parte, el mismo sistema de inyección de Nitrógeno seco para mantener un atmósfera seca, ayudará a mantener una temperatura constante para todo el detector. Este sistema no está en funcionamiento todavía. El método principal ara evitar esas derivas es la variación de los voltajes, de forma que compense la desviación de la ganancia con la temperatura ⁷.

1.5.3. Corrección del voltaje de polarización

Para evitar estas variaciones, cada módulo preamplificador (que agrupa 16 canales) tiene un circuito de compensación, que modifica el voltaje nominal según la fórmula [GMB]

$$V = V_0 + k * (T - T_0)$$

Para los fotodiodos de Hamamatsu , Mesytec recomienda los valores [GMB]:

$$k = 0,84V/^{\circ}C, T_0 = 24,0^{\circ}$$

1.6. Control del detector CALIFA

Debido a todo lo anteriormente explicado, las particularidades del detector CALIFA respecto a la adquisición y control son por un lado, el elevado número de canales (1952), y por otro, la fuerte dependencia de la temperatura que presentan los APD.

⁷En realidad hay una contribución mas a la estabilidad térmica de los cristales. En primer lugar, entre los cristales y la carcasa exterior hay un espacio vacío que proporciona un aislamiento adicional.

En sistemas complejos resulta natural dividir la operación de cualquier detector en **adquisición** (la lectura de los datos) y **control** (control del sistema). El control del sistema se divide generalmente en 2 modos, determinados por los regímenes temporales. Por una parte está el control inmediato para que el proceso no se salga de los parámetros establecidos, y por otra parte está la decisión y regulación de esos parámetros para que el proceso se encuentre en el estado que se considera óptimo. En la literatura inglesa se habla de *control* y *slow control* o a veces, de “fast control” frente a “slow control”. Aquí nos referiremos al slow control con el término *control*, y al fast control como *control inmediato*

El control inmediato (ingl. “*fast control*”) es por lo general simple en su estructura y tiene por objetivo mantener uno o varios parámetros dentro de un rango aceptable, frente a las perturbaciones que pueden afectar la operación. Es implementado en dispositivos físicamente adyacentes o incluso en la electrónica del mismo detector, lo que le permite reaccionar en los tiempos adecuados. En el caso de CALIFA, el control inmediato lo forman los sistemas de compensación de ganancia según la temperatura y las fuentes individuales de alimentación para cada canal, implementados en los módulos preamplificadores.

Complementariamente, el control de parámetros (ingl. “*slow control*”), fija los puntos de trabajo del detector y opera en escalas de tiempo mas amplias (del orden de segundos), y obedece al comando del usuario. Su misión, como ya se ha explicado es fijar los puntos de control para el control inmediato. Típicamente está situado físicamente lejos del detector y conectado a él mediante una red de datos de campo o, cada vez mas frecuentemente, una red convencional TCP/IP.

1.7. Experimentos realizados en R3B significativos para este trabajo

Para ilustrar algunos de los objetivos del dispositivo experimental R3B, y con objeto de ilustrar referencias posteriores en el texto, se listan a continuación algunos experimentos significativos para este trabajo con CALIFA.

1.7.1. S444: Puesta a punto (*commissioning*) del detector

El experimento S444 fue un experimento para probar todos los sistemas de CALIFA, en concreto la toma de datos y reconstrucción de eventos, y la coordinación con el trazador para determinar las trayectorias.

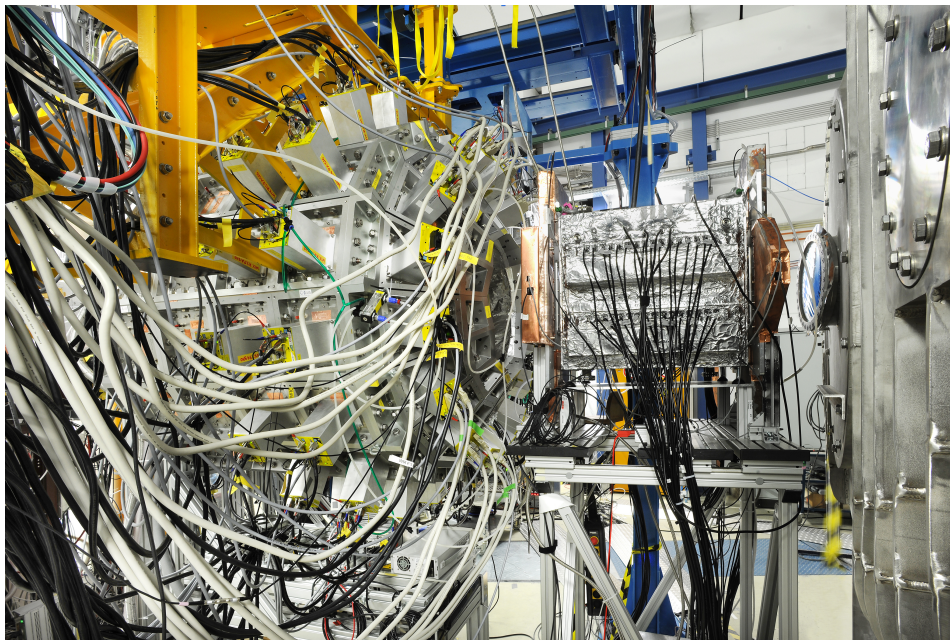


Figura 1.20: Foto de una mitad de CALIFA, mostrando los módulos en el exterior y las conexiones al sistema de control y adquisición.

La reacción utilizada fue la dispersión elástica de protones de alta energía (300,500 y 700 MeV, $1E7$ partículas por segundo), en un blanco de polietileno y reacciones $p,2p$ en un blanco de ^{12}C ($E = 400-1200$ AMeV) [Col17a].

1.7.2. S454: Sección eficaz de $^{12}C(\alpha, \gamma)^{16}O$

Estudio de la reacción $^{12}C(\alpha, \gamma)^{16}O$ a bajas energías. La sección eficaz de esta reacción a baja energía es de gran interés astrofísico ya que forma parte de la cadena de producción de Carbono y Oxígeno en el medio intraestelar: la proporción C/O determina, además, el desarrollo posterior de la estrella y la abundancia relativa de elementos mas pesados.

El estudio directo de esta reacción a las energías deseadas de 300keV es imposible dada la ínfima sección eficaz ($10^{-17}b$). En el experimento, se indujo la reacción inversa mediante excitación coulombiana de núcleos de Oxígeno, empleando un haz de Oxígeno sobre un blanco de plomo.

Durante el experimento, el detector CALIFA era central para poder diferenciar y aislar los sucesos que provenían del canal de excitación frente a otros canales (principalmente break-up), utilizando los varios blancos disponibles.

1.7.3. S515: Secciones eficaces de isótopos de estaño

El experimento S515 tuvo como objetivo el estudio de las secciones eficaces para varias reacciones (excitación coulombiana, knockout de uno o varios neutrones) sobre la serie de isótopos de Estaño. El conocimiento de estas secciones eficaces en núcleos ricos en neutrones es importante no solo en el campo de estructura nuclear, si no también en astrofísica nuclear donde puede ayudar a testear modelos de ecuaciones de estado para materia nuclear asimétrica, clave para el entendimiento de las estrellas de neutrones.

Dado que las secciones eficaces son altas (del orden de 0.1b), se obtenían resultados con muy poco tiempo de haz, lo que permitió muchos cambios de configuración, blancos y haz para abarcar toda la serie de isótopos y canales.

Capítulo 2

Diseño e implementación del sistema de control de parámetros

2.1. Objetivo

La necesidad de implementación de un sistema de control global de parámetros para CALIFA surgió muy pronto durante el diseño, cuando aún no estaba construido el detector y comenzamos a hacer pruebas con conjuntos de detectores agrupados en cajas (llamadas pétalos ¹). Durante otoño de 2018 comenzaron las primeras pruebas y se escribieron los primeros códigos de control de parámetros: primero para solucionar la toma de datos de esa campaña, y luego ampliando los requisitos para servir al futuro detector CALIFA, **En este proceso, me fue asignada a mi la responsabilidad del montaje y gestión del control de parámetros de CALIFA.**

Los parámetros que se controlan en CALIFA, para cada detector individual son:

¹Los pétalos fueron unas cajas provisionales de acero utilizadas durante la fase inicial de desarrollo, que contenían cada una hasta 180 cristales cada una.

- Voltaje de polarización (Lectura/Escritura)
- Compensación del voltaje con la variación de temperatura (Lectura/Escritura)
- Rango del preamplificador (Lectura/Escritura)
- Temperatura (Lectura)
- Aplicación/desconexión progresiva del alto voltaje (Escritura): Cada módulo preamplificador puede estar en 2 estados: con voltaje aplicado (ing. “*ramped-up*”) o sin voltaje. Las fuentes integradas en los preamplificadores se encargan de generar las rampas de subida y bajada del voltaje, aunque, como se explica en el texto, han demostrado ser demasiado inválidas por ser demasiado rápidas para algunos cristales.
- Corriente de fuga (lectura) : Hay disponible una lectura de corriente total por cada grupo de 16 cristales.
- Información de errores en las fuentes de voltaje del preamplificador: (solo lectura)
- Umbrales (*thresholds*) para la adquisición : provisionalmente manejado por otras aplicaciones. No se consideran en esta memoria

Y para todo CALIFA:

- Temperatura y flujo de la refrigeración de N_2 : No existe aún el dispositivo
- Apertura, cierre y estado del detector : No existe aún el dispositivo
- Estado de las fuentes generales de alimentación: Estas son las fuentes que alimentan los preamplificadores con bajo voltaje (+5/-5/+12/-12V) para su funcionamiento

De todos estos parámetros, a día de hoy, la refrigeración y la apertura automática no están aún instalados (los prototipos están aún en los laboratorios de origen) y los umbrales son manejados actualmente por un programa ya existente, por lo que aunque se prevé una futura integración, no constituye el objetivo de este trabajo.

Con los parámetros individuales, y dado el alto número de detectores (1952 en su versión completa, 1560 actualmente), es necesario poder hacer y manejar grupos, según las operaciones. Para la temperatura, es necesario saber la media entre varios sensores distribuidos en diferentes regiones, y poder seguir la evolución temporal. En cuanto a los voltajes, se desea poder definirlos tanto individualmente, como en grupo,

así como aumentar o disminuir mediante un factor o un incremento común, grupos de cristales adyacentes, durante la fase de puesta a punto, y poder cargar valores de un fichero o desde una base de datos de cara al experimento. Posteriormente, debe ser posible recuperar el estado del detector para cualquier momento de un experimento pasado.

2.2. Requisitos

Los requisitos encontrados inicialmente fueron:

- Registrar todos los parámetros en una base de datos común a todos los detectores de R3B. Esto debe ser realizado periódicamente para poder saber la configuración durante las etapas de análisis.
- Disponer de una interfaz gráfica de usuario (*GUI*, “Graphical User Interface”) para permitir que operadores no familiarizados con el control puedan determinar el estado correcto del detector y tomar algunas medidas correctivas si falla algún dispositivo durante un turno en el que los expertos no estén disponibles.
- Desarrollar una interfaz de texto para acceso remoto. Esta interfaz deberá tener las mismas funcionalidades que la gráfica. En retrospectiva, la interfaz en modo texto ha demostrado ser muy ventajosa, puesto que en varios experimentos ha permitido implementar cambios de última hora (por ejemplo, cambio de rango para los anillos impares en S515) que de otra manera no hubieran sido posibles de realizar a tiempo.
- Definir una interfaz con la arquitectura de control EPICS: El estándar para el experimento R3B es la interfaz EPICS, (EPICS es un conjunto de programas que constituyen una plataforma de desarrollo para el control de procesos complejos. Hoy en día, es uno de los principales estándares en control). En este punto hay que indicar que este requisito aún no se ha implementado completamente, si bien se ha avanzado hacia la compatibilidad: como se explicará mas abajo, limitaciones del bus de campo que controla los preamplificadores, hicieron imposible el uso de algunas partes estándar del sistema EPICS.

Por el contrario, muchos otros de los requisitos no han estado determinados desde el inicio y se han ido incorporando durante los diferentes campañas de desarrollo (desde el *Demonstrator* hasta el último experimento en 2021): debido a la aparición de problemas, han surgido nuevas necesidades que han sido incorporadas al diseño o han hecho cambiar algunos aspectos. Estos requisitos surgieron bien de limitaciones

del hardware respecto a lo diseñado o bien de la forma de solucionar errores durante el montaje:

- Problemas con algunos de los cristales entregados inicialmente, hicieron imposible confiar en las rampas de variación de voltaje presentes en el hardware de los preamplificadores, con lo que ha habido que incluir esa funcionalidad mediante software.
- La lectura y escritura en los módulos amplificadores, realizada a través de bus de control de Mesytec es mucho mas lenta de lo especificado, obligando a un uso extensivo de memorias intermedias (*cachés*) y concurrencia, entre otras medidas, para mitigar el gran retardo acumulado (sección 2.7.3).
- Durante las pruebas, se observó que la actualización o lectura de algunos parámetros en cualquier preamplificador introducía ruido en la cadena de adquisición. Esto obliga a leer o realizar cambios únicamente durante el periodo entre pulsos de haz (periodo denominado Offspill).
- Registro en un fichero en todo momento de cada cambio en CALIFA así como del estado general, de forma que se pueda reproducir posteriormente el estado del detector en cualquier momento del experimento, no solo tras el volcado periódico del estado en una base de datos. Tener la posibilidad de ver el detector en cualquier configuración anterior con tan solo introducir la fecha y la hora.
- Finalmente, en vista de la dificultad de algunas operaciones especiales, necesarias durante el montaje, se decidió, también, crear y proporcionar un microlenguaje de configuración de CALIFA (llamado **Califact1**) que permite a un usuario crear y tratar grupos de cristales o preamplificadores de una manera sencilla. Este microlenguaje, abre la puerta a la manipulación de CALIFA por otros programas locales o remotos, y su configuración e inspección rápida mediante órdenes de la línea de comandos (*shell*), lo que permite un enlace con aplicaciones de control estándar como MEMS y EPICS (ver sección 2.6).

Los tres primeros requisitos, derivados de la experiencia *in-situ* han cambiado completamente la forma de la lógica de control, y comprenden la mayor parte del esfuerzo de este trabajo. La soluciones encontradas se detallan en la sección 2.7.2

2.3. Estructura de la cadena de adquisición para un canal

En lo que respecta al control, CALIFA es esencialmente una suma de 1952 de detectores individuales, así que lo más útil es comenzar con la descripción de uno de ellos:

Cada detector se compone de un cristal centelleador, acoplado a un diodo APD (ver sección 1.5). El diodo está polarizado en inversa en la región lineal (es decir, que el paso de una partícula genera una corriente amplificada pero proporcional a su energía). Esta polarización se aplica por el mismo circuito por el que se recibe la señal: la señal se desacopla con un condensador (ver figura 2.1). El cable que proporciona el voltaje tiene una rama acoplada en alta frecuencia (condensador) que sirve como señal de entrada al circuito de amplificación. El preamplificador es un integrador-diferenciador (R-C-R) que genera una señal de rápida subida (decenas de nanosegundos) y un largo tiempo de bajada, de varios microsegundos) (ver figura 2.1).

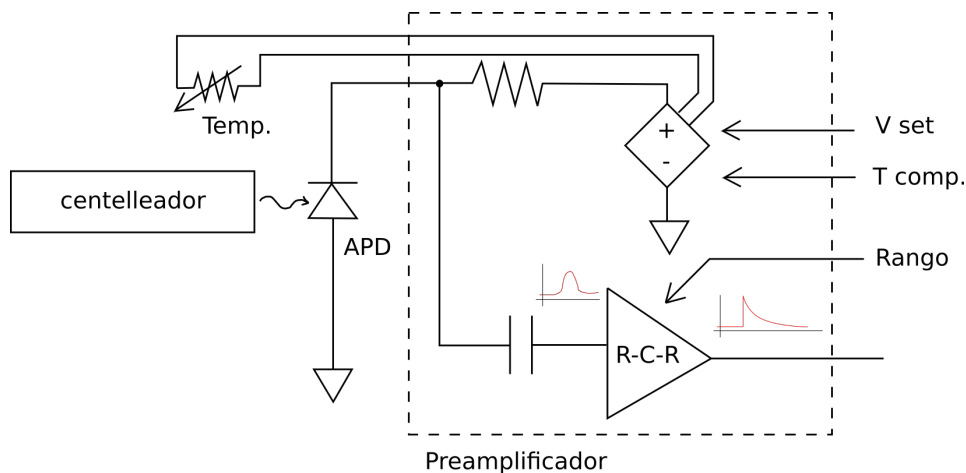


Figura 2.1: Estructura electrónica de un canal de adquisición.

2.3.1. Control de Temperatura

Como ya se ha explicado (ver capítulo 1), los APDs sufren de una pérdida de ganancia con la temperatura, con un coeficiente de aproximadamente $-2.8\%/^{\circ}\text{C}$, en el entorno de 23°C [groa]. Mantener una ganancia estable durante todo el experimento es fundamental, dado que uno de los requisitos principales de CALIFA es tener una resolución en energía menor de 6% , que se encuentra al límite de la que presenta el

montaje ² de los cristales de CsI, de los cuales se han eliminado los que no presentaban una resolución mejor del 6 %: por tanto, una variación (sin compensar) de tan solo un grado en la temperatura, añadiría un 2 % adicional y debe de ser evitada o compensada [groa].

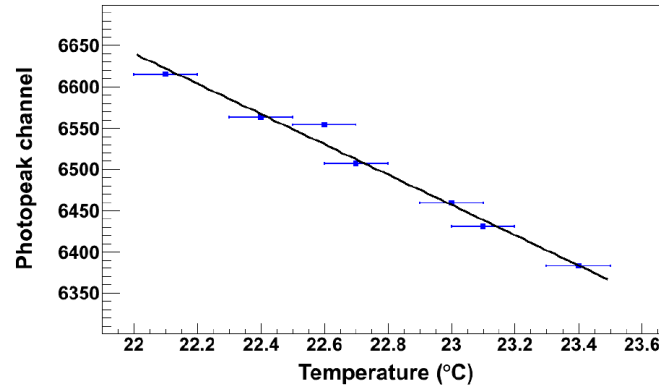


Figura 2.2: Dependencia de la amplificación con la temperatura, (medidas de la colaboración, con fuente de Cs, fuente [groa]).

Para evitar esta dispersión, se dispone de varios medios complementarios: En primer lugar, una sistema de inyección de nitrógeno seco que tiene la función doble de mantener la humedad al mínimo dentro del detector para alargar la vida de los cristales, y de proporcionar una temperatura constante³. La segunda medida para evitar la degradación de la resolución es aprovechar la dependencia del factor de amplificación con el voltaje de operación para compensar cualquier deriva por cambios de temperatura. En tercer lugar, se trabaja con un voltaje 5V menor del nominal, lo que resulta en una mayor estabilidad de la ganancia frente a la temperatura, a costa de menor factor de amplificación.

Todos estos métodos se usan en CALIFA para mantener la temperatura: la razón por la que se necesita utilizar varios métodos complementarios contra esta variación, radica en que aunque únicamente con cambios en el voltaje de operación se puede mantener la ganancia estable, los APDs presentan una resolución en energía que depende del voltaje. Esta dependencia tiene una forma parabólica, con un mínimo para un valor determinado (dependiente de cada unidad y tabulado por la empresa fabricante [Hama]). Este es el valor inicial con el que se trabaja, y es deseable alejarse lo menos posible para no perjudicar la resolución.

²Se habla de montaje, puesto que la resolución depende en cierta medida del ruido y el empaquetado con plástico reflectante, y no únicamente del material centelleador.

³Hasta la fecha, este sistema solo consta de una bala de Nitrógeno, sin control de temperatura.

El ajuste de ganancia del detector (esencialmente, una calibración en energía utilizando los voltajes de operación, que se detalla mas adelante), desplaza el punto de operación fuera desde esta región óptima, así que es deseable que la compensación por temperatura no añada incrementos adicionales de voltaje. o que estos sean lo menor posible. Por eso se delega la compensación en 2 mecanismos complementarios: principalmente evitar en lo posible variaciones, manteniendo CALIFA con una temperatura estable, y adicionalmente, compensar las pequeñas desviaciones residuales mediante variaciones en los voltajes de polarización.

Con este objetivo, los módulos preamplificadores, que llevan integrada la fuente de voltaje, cuentan con un sistema de compensación del voltaje con la temperatura. Así, para un voltaje seleccionado V , el voltaje real será:

$$V = V_0 + K * (T - T_0)$$

Donde T_0 es 24 °C, y el parámetro K puede variar entre -1.79V/°C y +1.79V/°C. [GMB]

2.3.2. Módulos preamplificadores

Los módulos que componen el preamplificador del detector han sido fabricados por la empresa Mesytec [GMB], siendo una variación adaptada a CALIFA de uno de los módulos estándar que producen. Esta variante, llamada MPRB32C, encapsula 2 módulos de 16 preamplificadores cada uno, junto con el mismo número de fuentes de alimentación, optimizadas para el rango de voltajes de los APDs (de 0 a 600V). Estas fuentes de alimentación cuentan con un circuito de compensación por temperatura. en la figura 2.3 puede verse uno de los módulos junto con una explicación de la estructura electrónica interna.

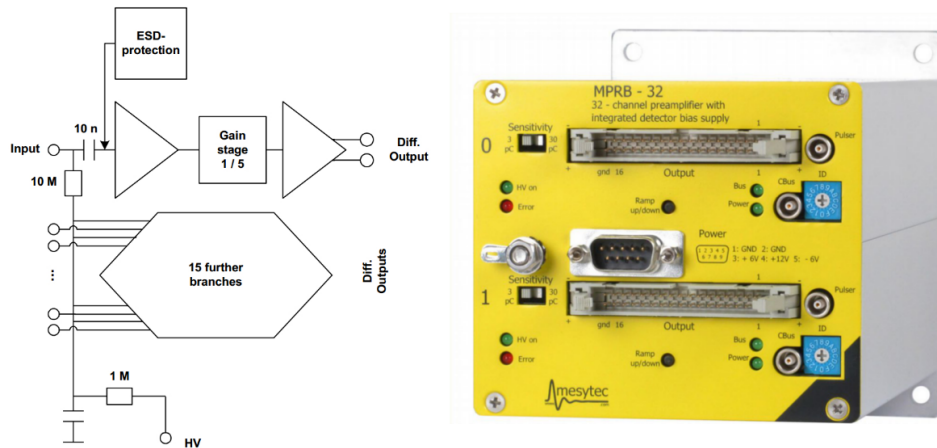


Figura 2.3: Preamplificador MPRB32 de Mesytec, junto con diagrama interno.

Además, cada módulo contiene lógica de control, que interpreta los comandos del bus de control y configura los parámetros de cada uno de los preamplificadores y fuentes de alimentación.

En cuanto a las fuentes de alimentación integradas, además de la compensación por temperatura, es importante señalar algunas otras características, relevantes para esta memoria:

- Solo hay una lectura de corriente total para cada grupo de 16 canales. Esto implica que cuando fallan detectores (bien porque el APD se ha destruido, o porque hay algún cortocircuito), no es fácil determinar que canal o canales son los responsables. En la práctica se recurría a una toma de datos con una fuente de calibración, en la que se podía ver que canales generaban ruido. En otros casos ha habido que desconectar uno por uno o recurrir a un proceso de búsqueda canal por canal, bajando la polarización en todos los canales y observando la tendencia de la corriente total.
- Siendo 16 fuentes de alimentación diferentes, los 16 canales están relacionados entre sí: no puede haber una diferencia mayor de 150 V entre canales: aunque en la bibliografía [GMB] aparece 300 V como límite, en la práctica se observa que se activa la señal de error en los canales implicados si su diferencia supera los 150 V.
- De la misma manera, no hay una lectura de comprobación (*Read-back*) de los voltajes seleccionados. Unas variables en el módulo (*flags*) indican errores genéricos en cada canal: la causa puede ser la imposibilidad de proporcionar el voltaje solicitado debido a una corriente de fuga alta, pero por debajo de ese

umbral, no es posible saber si la corriente de fuga es anormalmente alta, aun dentro de los límites

- Un cambio brusco de voltaje de un canal puede ocasionar daños a los APDs. Este problema, debido a que la unión PN es en esencia un condensador y se generan corrientes de desplazamiento cuando la zona de depleción varía su extensión, es común a todos los detectores de estado sólido pero se ve agravado en los fotodiodos, por su gran área y zona estrecha de depleción. Los APDs están diseñados para trabajar en inversa con corrientes de fuga del orden de nanoamperios: cualquier salto mayor de 20V podía dañarlos. Se da la circunstancia de que los preamplificadores, originalmente pensados para otro tipo de experimentos mas sencillos, generan rampas de subida y bajada de corriente cuando se actúa sobre el control principal que activa o desactiva el voltaje de todo el grupo. Por el contrario, si se varía el voltaje estando encendido, se limitan a aplicar el nuevo valor al detector. Los programas de control, por tanto, tuvieron que ser diseñados de forma que generasen una rampa hasta el nuevo valor. En los últimos experimentos se usó una rampa de **20V/s**: este valor se basa más en la experiencia adquirida por los grupos que han hecho el ensamblado de los cristales que en una experimentación sólida de los límites.

2.4. Estructura global de la adquisición y el sistema de control de parámetros

Según diseño de los módulos preamplificadores, la parte inicial de la cadena de adquisición (el preamplificador y la fuente de voltaje para el APD están agrupados en circuitos impresos (llamados “módulos” en este trabajo) de 16 canales cada uno. Estos a su vez, se agrupan en una caja física (el MPRB32C) con 2 módulos ($16 \times 2 = 32$ canales) que va atornillada a la carcasa exterior del detector (figura 1.10 y 2.4). Cada módulo contiene, además, un sensor de temperatura. Esta agrupación viene impuesta por la compra de los preamplificadores y condiciona tanto la estructura mecánica (la carcasa esta dividida en segmentos llamados azulejos (ing. “tiles”) que acoplan con un módulo cada uno), como las agrupaciones posteriores de canales en control y adquisición (figura 2.4).

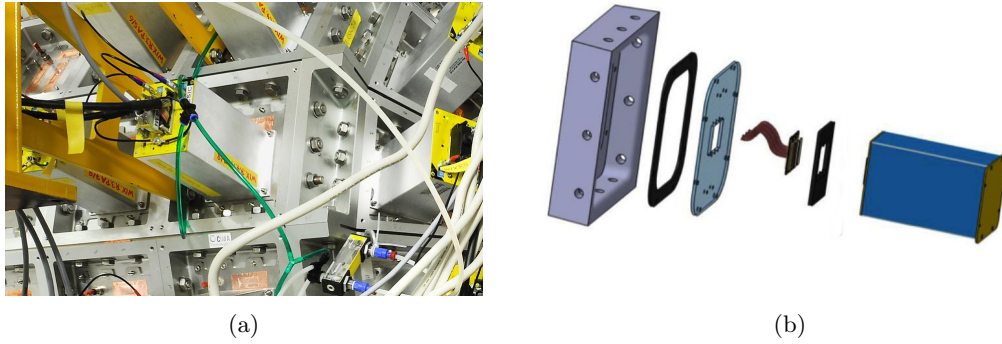


Figura 2.4: Acoplamiento de los preamplificadores a la estructura externa de CALIFA.

Cada módulo es controlado mediante un bus de campo que proporciona la propia empresa, llamado "*Mesytec control Bus*", que es una variante de un protocolo de transmisión en serie. La capa física utiliza cables (Lemo1) que van encadenando (Daisy-chain) un módulo tras otro hasta un total de 16^4 , acabando en una impedancia de 50Ω (número 2 en la figura 2.5). Por limitaciones del diseño, solo se ha conseguido hacer funcionar este bus a 9600 Baudios, y esta velocidad requiere introducir un retardo adicional para ignorar posibles rebotes de señal tras el envío del comando. Este problema, dado el número de canales, ha tenido también repercusiones importantes en el sistema de control (ver sección 2.6).

Esta estructura de módulos determina la topología del sistema de control. La empresa fabricante de los preamplificadores suministra también módulos NIM controladores (número 3 en figura 2.5), con dos buses de control de 16 canales cada uno, totalizando 32 canales por controlador.

Para cubrir todos los cristales de una mitad, por tanto, utilizamos 2 módulos controladores, conectados cada uno mediante un puerto USB con un ordenador intermedio de control (número 4 en 2.5) (ICC, *Intermediate Control Computer*), responsable de esa mitad del detector, tanto para el control de parámetros como para otras tareas (como umbrales, y control de adquisición).

⁴Nótese que el bus pasa, por lo tanto, por 8 cajas de preamplificadores, con 2 módulos cada una.

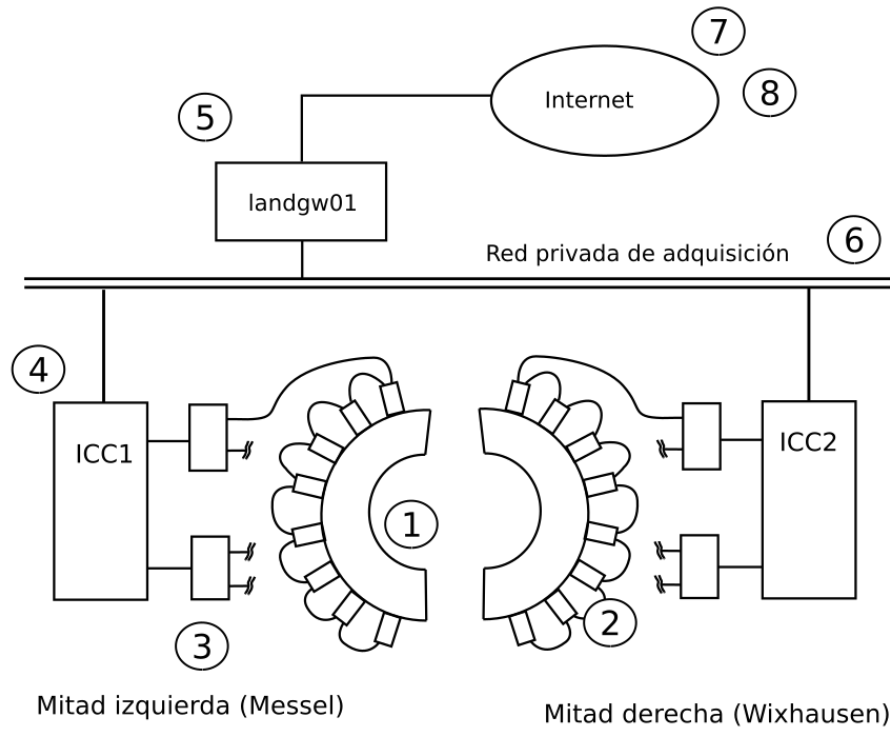


Figura 2.5: Esquema de la arquitectura hardware para el control de CALIFA (explicación en el texto).

En total, por tanto, se dispone de: 2 mitades x 2 módulos de control x 2 buses x 16 módulos x 16 canales = 2048 canales. Actualmente están ocupados únicamente 780 por cada mitad, para un total de 1560 cristales, de los 1952 finales.

Cada mitad del detector contiene por tanto, el ordenador de control, además de un ordenador de adquisición, las fuentes de voltaje, y el resto de la cadena de adquisición para cada canal, físicamente cercanos al detector. Adicionalmente se dispone de un ordenador maestro de control, llamado `landgw01` (número 5 en la figura 2.5), que contiene el programa principal de control de parámetros.

2.4.1. Nomenclatura de los cristales

En este punto es importante explicar las diferentes formas de referir o acceder a un canal: Para un mismo cristal, existen actualmente 2 formas diferentes de identificación: de *adquisición* y de *control*⁵, que obedecen a las diferentes arquitecturas para la toma de datos y control. Durante el diseño de CALIFA y el experimento, las

⁵Realmente existe una tercera, la geométrica, pero que no tiene relevancia en este nivel de procesamiento.

diferentes partes de control y adquisición se desarrollaron separadamente, y usan cada una un sistema diferente: los programas deben poder convertir entre ellas durante la operación.

WIXHAUSEN SIDE					MESSSEL SIDE				
Ring 1	Ring 2	Ring 3	Ring 4	iPhos	iPhos	Ring 4	Ring 3	Ring 2	Ring 1
PreAmp 1 & 2		Slow Control 0.0.c & 0.0.d SFPFEDEX 0.c & 0.d	Slow Control 0.0.a & 0.0.b SFPFEDEX 0.a & 0.b	Slow Control 0.1.c & 0.1.e SFPFEDEX (DR) 1.c(1.f & 1.g(1.f	Slow Control 0.1.c & 0.1.e SFPFEDEX (DR) 1.c(1.f & 1.g(1.f	Slow Control 0.0.e & 0.0.f SFPFEDEX 0.e & 0.f	Slow Control 0.0.c & 0.0.d SFPFEDEX 0.c & 0.d		PreAmp 1 & 2
PreAmp 3 & 4		Slow Control 0.0.g & 0.0.h SFPFEDEX 0.g & 0.h	Slow Control 0.0.a & 0.0.b SFPFEDEX 0.a & 0.b	Slow Control 0.1.g & 0.1.a SFPFEDEX (DR) 1.g(1.b & 1.d(1.b	Slow Control 0.1.g & 0.1.a SFPFEDEX (DR) 1.g(1.b & 1.d(1.b	Slow Control 0.0.g & 0.0.h SFPFEDEX 0.g & 0.h	Slow Control 0.0.g & 0.0.h SFPFEDEX 0.g & 0.h		PreAmp 3 & 4
PreAmp 5 & 6		Slow Control 0.0.4 & 0.0.5 SFPFEDEX 0.4 & 0.5	Slow Control 0.0.6 & 0.0.7 SFPFEDEX 0.6 & 0.7	Slow Control 0.1.4 & 0.1.6 SFPFEDEX (DR) 1.4(1.5 & 1.6(1.7	Slow Control 0.1.4 & 0.1.6 SFPFEDEX (DR) 1.4(1.5 & 1.6(1.7	Slow Control 0.0.6 & 0.0.7 SFPFEDEX 0.6 & 0.7	Slow Control 0.0.4 & 0.0.5 SFPFEDEX 0.4 & 0.5		PreAmp 5 & 6
PreAmp 7 & 8		Slow Control 0.0.0 & 0.0.1 SFPFEDEX 0.0 & 0.1	Slow Control 0.0.2 & 0.0.3 SFPFEDEX 0.2 & 0.3	Slow Control 0.1.0 & 0.1.2 SFPFEDEX (DR) 1.0(1.1 & 1.2(1.3	Slow Control 0.1.0 & 0.1.2 SFPFEDEX (DR) 1.0(1.1 & 1.2(1.3	Slow Control 0.0.2 & 0.0.3 SFPFEDEX 0.2 & 0.3	Slow Control 0.0.0 & 0.0.1 SFPFEDEX 0.0 & 0.1		PreAmp 7 & 8
PreAmp 9 & 10		Slow Control 1.0.0 & 1.0.1 SFPFEDEX 3.0 & 3.1	Slow Control 1.0.2 & 1.0.3 SFPFEDEX 3.2 & 3.3	Slow Control 1.1.0 & 1.1.2 SFPFEDEX (DR) 2.0(2.1 & 2.2(2.3	Slow Control 1.1.0 & 1.1.2 SFPFEDEX (DR) 2.0(2.1 & 2.2(2.3	Slow Control 1.0.2 & 1.0.3 SFPFEDEX 3.2 & 3.3	Slow Control 1.0.0 & 1.0.1 SFPFEDEX 3.0 & 3.1		PreAmp 9 & 10
PreAmp 11 & 12		Slow Control 1.0.4 & 1.0.5 SFPFEDEX 3.4 & 3.5	Slow Control 1.0.6 & 1.0.7 SFPFEDEX 3.6 & 3.7	Slow Control 1.1.4 & 1.1.6 SFPFEDEX (DR) 2.4(2.5 & 2.6(2.7	Slow Control 1.1.4 & 1.1.6 SFPFEDEX (DR) 2.4(2.5 & 2.6(2.7	Slow Control 1.0.6 & 1.0.7 SFPFEDEX 3.6 & 3.7	Slow Control 1.0.4 & 1.0.5 SFPFEDEX 3.4 & 3.5		PreAmp 11 & 12
PreAmp 13 & 14		Slow Control 1.0.8 & 1.0.9 SFPFEDEX 3.8 & 3.9	Slow Control 1.0.8 & 1.0.9 SFPFEDEX 3.8 & 3.9	Slow Control 1.1.8 & 1.1.a SFPFEDEX (DR) 2.8(2.9 & 2.9(2.b	Slow Control 1.1.8 & 1.1.a SFPFEDEX (DR) 2.8(2.9 & 2.9(2.b	Slow Control 1.0.8 & 1.0.9 SFPFEDEX 3.8 & 3.9	Slow Control 1.0.8 & 1.0.9 SFPFEDEX 3.8 & 3.9		PreAmp 13 & 14
PreAmp 15 & 16		Slow Control 1.0.c & 1.0.d SFPFEDEX 3.c & 3.d	Slow Control 1.0.e & 1.0.f SFPFEDEX 3.e & 3.f	Slow Control 1.1.c & 1.1.e SFPFEDEX (DR) 2.1(2.d & 2.2(2.f	Slow Control 1.1.c & 1.1.e SFPFEDEX (DR) 2.1(2.d & 2.2(2.f	Slow Control 1.0.e & 1.0.f SFPFEDEX 3.e & 3.f	Slow Control 1.0.c & 1.0.d SFPFEDEX 3.c & 3.d		PreAmp 15 & 16

Figura 2.6: Esquema de la nomenclatura de los cristales y correspondencia entre los dos diferentes sistemas, a nivel de módulos.

La diferencia a nivel de módulos, viene por los diferentes buses de control y adquisición (ver correspondencia en figura 2.6). La correspondencia entre los bloques de 16 canales es lógica: SFP0 y SFP3 se ocupan de la zona lateral y SFP1 y SFP2 de la zona del IPhos, como se puede ver en la tabla (cada detector IPhos genera 2 canales de adquisición para medidas de alta y baja energía). Sin embargo, por motivos relacionados con la disposición física de los canales en los conectores de los preamplificadores, y la entrada a las FPGAs en las tarjetas digitalizadoras, la correspondencia entre las dos nomenclaturas a nivel de canal dentro de un módulo es completamente arbitraria (se adjunta la tabla 2.1). La aplicación de control realiza internamente esta correspondencia para que los canales se correspondan con los mostrados en la adquisición.

Para ilustrarlo con un ejemplo: El cristal denominado Mitad 1 (Wixhausen), Anillo 3, preamplificador 8, canal 7, tiene la dirección de control Mitad 1, controlador 2 (que abarca anillos 2 y 3), bus 1, preamplificador 8 y canal 7. El mismo cristal aparecerá en los ficheros de datos de la mitad 1 de CALIFA (recordemos que CALIFA son 2 detectores en lo que respecta a la adquisición, llamados *Wixhausen*, la parte derecha y *Messel* la parte izquierda, respectivamente), SFP 1, tarjeta 8, y canal 0.

Control ->Adquisición				Adquisición ->Control			
canal (ctrl)	canal (adq)	canal (ctrl)	canal (adq)	canal (ctrl)	canal (adq)	canal (ctrl)	canal (adq)
1	6	9	8	0	7	8	9
2	5	10	15	1	6	9	16
3	4	11	14	2	5	10	15
4	3	12	13	3	4	11	14
5	2	13	12	4	3	12	13
6	1	14	11	5	2	13	12
7	0	15	10	6	1	14	11
8	7	16	09	7	8	15	10

Cuadro 2.1: Correspondencia entre canales de adquisición y de control, dentro de cada módulo.

2.5. Arquitectura del software para el control

La arquitectura del sistema de control y su agrupación en módulos, viene definida por la elección del preamplificador (dado que Mesytec solo proporciona un tipo de bus de control), y el hecho de que el detector CALIFA esta partido en 2 mitades, completamente independientes y móviles ⁶, para permitir el acceso a la cámara de reacción.

Puesto que una cadena de adquisición en su extremo final solo necesita para una mitad completa de CALIFA un solo cable de potencia y otro de red para transmitir los datos, mientras que en el extremo inicial es necesario como mínimo un cable por canal (y adicionalmente un bus de control y alimentación para cada módulo), es lógico colocar toda la adquisición y el control físicamente cerca del detector: la experiencia previa con otros detectores similares (XtalBall) sitúa a los cables móviles como la causa principal de ruido y problemas de conexión ⁷

Colocados directamente al lado de CALIFA se encuentran dos ordenadores (uno por cada mitad) llamados ICC (siglas de “**i**ntermediate **c**ontrol **c**omputer”): estos ordenadores albergan los controladores de bajo nivel de los amplificadores, y están conectados a una red interna de adquisición y control, sin salida a internet.

A esta red está también conectado el ordenador principal de control, `landgw01`, que es el que alberga el software principal de control. Este ordenador actúa también de puente entre la red de control y el mundo exterior.

⁶De hecho, respecto a la adquisición general en R3B, CALIFA son , en realidad, dos detectores, uno por cada mitad, completamente independientes.

⁷Durante las campañas de 2021, la fuente principal de ruido y errores, una vez arreglados los cristales defectuosos, resultaron ser los cables y algunos conectores que no quedaban bien asentados tras algún movimiento de CALIFA y generaban ruido, llegando a comprometer la adquisición.

2.6. La plataforma de control EPICS y los controladores alternativos

La plataforma de control EPICS es una de las plataformas de control mas usadas en la industria, y es la utilizada en los experimentos de FAIR y en R3B. Está organizada en 2 capas:

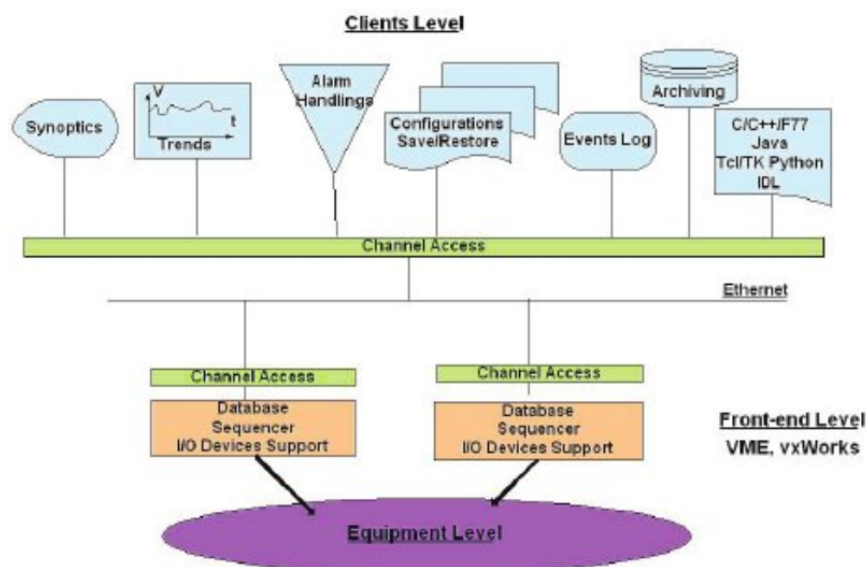


Figura 2.7: Esquema de la arquitectura EPICS.

La capa inferior está formada por un conjunto de programas que se encargan de abstraer los detalles de los controladores de variables o parámetros, para presentarlos de una manera unificada, como variables físicas (con unidades) e implementar otras características útiles como límites, alarmas o periodos de refresco. Cada proceso o detector tiene su propia electrónica y EPICS no especifica nada acerca de la estructura o el lenguaje de estos controladores. El único requisito impuesto a los controladores es poder comunicarse con la base de datos general de la instalación de EPICS, usando un protocolo llamado CA (siglas de *channel access*).

En posición intermedia se encuentra el núcleo del sistema: la base de datos EPICS, que contiene los valores actuales de todos los parámetros, actualizada por los controladores a través del protocolo CA. Estos valores, así como la configuración de cada canal, almacenados en la base de datos, pueden ser consultados y modificados por las aplicaciones de la capa superior.

La capa superior está compuesta de todas las aplicaciones, que acceden a la base de datos para leer o modificar valores.

- Las unidades físicas, además de convertir los valores digitales en medida física de alguna magnitud.
- La frecuencia con la que se actualiza (si se actualiza periódicamente).
- los valores extremos fuera de los cuales se señalará una emergencia.

Es importante explicar que aunque EPICS solo define las interfaces y los protocolos que deben seguir los programas para adherirse al estándar (cualquier controlador que cumpla con los requisitos y el protocolo DCA puede ser añadido a un sistema EPICS y de la misma manera, cualquier aplicación que consulte y modifique la base de datos, se considera una aplicación EPICS), dada la complejidad que esta plataforma ha adquirido con el tiempo, la comunidad que trabaja con EPICS publica controladores para todos los tipos básicos de proceso, así como algunas aplicaciones del nivel superior.

2.6.1. Controladores alternativos

La idea inicial para el control era utilizar estos prototipos de controladores (Input/Output controllers, *IOCs*) que proporciona la plataforma. EPICS dispone de unos controladores genéricos para todos los sistemas controlados con protocolo serie. Usándolos, solo es necesario configurarlos y conectar las aplicaciones de control a la capa superior (con el Common Channel Access), para así poder utilizar el almacenamiento conjunto de todo R3B, entre otros beneficios. Sin embargo, una vez implementado el sistema usando los prototipos proporcionados, surgieron problemas, en forma de fallos de comunicación y de saturación de los buses de control de los preamplificadores, que no podían ser resueltos con el nivel de configuración que permitían estos controladores, principalmente debidos a:

- La poca flexibilidad de control de los IOCs de EPICS a la hora de hacer la lectura periódica *Polling* del valor de los parámetros.
- Los problemas ya mencionados del bus de control de los preamplificadores de Mesytec, que obligan a introducir un retardo extra después de cada comando y esperar a que la lectura devuelva un resultado vacío, antes de intentar leer la respuesta.
- La escasa velocidad de este bus, que obliga a interponer una capa de resultados pre-almacenados entre los parámetros y los controladores, para minimizar el acceso real a los preamplificadores.

- La obligación de leer los datos en ráfagas, únicamente durante los periodos en los periodos entre pulsos de haz.

Tras intentar solucionar estos problemas de varias maneras (incluido bajar la velocidad, cambiar cables supuestamente defectuosos), se tomó la decisión de desarrollar unos controladores alternativos, similares en su función a los IOCs del sistema EPICS, que se comportasen de la misma manera y de forma que pudieran ser sustituidos en el futuro por otros estándar. En el futuro se prevé implementar unos controladores IOCs para EPICS desde cero, en vez de utilizar los modelos genéricos de EPICS. Por ahora, los controladores de bajo nivel, no son totalmente compatibles con el modelo EPICS, y se recurre a soluciones particulares para conseguir la integración con el resto de R3B. Las principales características de estos controladores alternativos son:

- Los controladores actuales no publican las variables de control al sistema EPICS, por lo tanto el detector aún no es accesible de la misma manera que otros detectores del experimento R3B. Los valores se graban en la misma base de datos que los otros detectores, por lo que no perjudica el desarrollo de experimentos, sin embargo, deberá ser solventado en el futuro.
- los controladores actuales no generan las rampas, ni publican los valores con unidades físicas. Todo se delega a la capa superior, donde un módulo de la aplicación asume las tareas de convertir los números leídos en unidades con sentido físico, imponer los límites y gestionar la generación de rampas, entre otras.

Para compensar esta desviación sobre el estándar y facilitar la conversión del control a la plataforma EPICS en un futuro, la capa de las aplicaciones sí sigue los estándares de control de EPICS.

2.6.2. Estructura del controlador alternativo

La estructura de este controlador *IOC* alternativo, que yo he desarrollado y se presenta en esta memoria, es la de un servidor que permite acceder desde un ordenador **remoto** a cualquier registro de los preamplificadores, usando el protocolo XMLRPC. Para CALIFA, hay dos controladores, uno para cada mitad, conectados a la red interna de adquisición, con direcciones **192.168.1.7** (para la mitad 1, llamada "Wixhausen") y **192.168.1.52** (para la mitad 2, llamada "lado Messel"). Los controladores funcionan ininterrumpidamente. Nótese que el ordenador **Landgw01**

actúa como puente (*bridge*) entre dos redes: la interna de adquisición y la externa e internet, por lo tanto, se puede acceder remotamente desde internet y es el único que puede acceder a CALIFA.

El programa pone marcha un servidor y entra en un bucle que escucha peticiones y actúa de acuerdo con la lectura o escritura de parámetros. Se muestra un breve resumen del listado. El listado completo puede ser encontrado en el repositorio [Per21]

```
1
2 interfaces = [
3     SerialInterface("/dev/serial/by-id/usb-
4         ↪ FTDI_FT245R_USB_FIFO_A903VV9Z-if00-port0", 9600),
5     SerialInterface("/dev/serial/by-id/usb-
6         ↪ FTDI_FT245R_USB_FIFO_A5074IWF-if00-port0", 9600)
7 ]
8
9 def read(controller, bus, module, address):
10     """
11     """
12     s = interfaces[controller\%2].read(bus, module, address)
13     return s
14
15 def write(controller, bus, module, address, value):
16     """
17     """
18     return interfaces[controller\%2].write(bus, module, address,
19         ↪ value)
20
21 def test():
22     return 1
```

Como se puede ver, el controlador solo define 3 funciones (**read**, **write** y **test**) y recibe comandos para escribir o leer valores de un registro de un modulo del bus. Toda la conversión ocurre en la interfaz de la aplicación que se describen mas abajo.

Las interfaces implementan el protocolo serie para comunicarse con los controladores del bus de Mesytec, a través de adaptadores USB/Serie.

Todas las aplicaciones, por tanto, acceden a estos controladores para controlar CALIFA.

2.7. Interfaz de consola

Dentro de las aplicaciones de alto nivel (*front-end*), la principal y primera en desarrollarse fue la aplicación de consola (por interfaz de consola, se entiende una aplicación interactiva en modo texto). En este caso, la aplicación permite colocar **CALIFA** en la configuración correcta para un experimento, comprobar el funcionamiento del detector y, como se verá mas adelante, controlar el procedimiento de ajuste de ganancia.

```

RING 5          RING 4          RING 3          RING 2          RING 1
16 15 [ 576 0 ][ 192 0 ] [-436 0 ][-1k! 0 ] [2328 0 ][-722 0 ] [-----][-----][-----][-----]
14 13 [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [-270 0 ][-271 0 ] [-340 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]
12 11 [-1k! 0 ][2563 0 ] [2437 0 ][-1k! 0 ] [-512 0 ][-817 0 ] [-----][-----][-----][-----]
10 9  [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [1532 0 ][-900 0 ] [2240 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]
8 7  [-1k! 0 ][2574 1 ] [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [-1k! 0 ][ 682 0 ] [-----][-----][-----][-----]
6 5  [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [-1k! 0 ][ 933 0 ] [-1k! 0 ][2955 0 ] [-----][-----][-----][-----]
4 3  [-1k! 0 ][-1k! 1 ] [-1k! 0 ][ 676 0 ] [ 178 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]
2 1  [-759 0 ][-1k! 0 ] [-1k! 0 ][-235 0 ] [1239 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]

[ W I X H A U S E N   H A L F ]
Beam <-----
[ M E S S E L   H A L F ]
2 1  [2491 0 ][1056 0 ] [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [-1k! 0 ][-407 0 ] [-----][-----][-----][-----]
4 3  [-107 0 ][-1k! 0 ] [-1k! 0 ][-494 0 ] [1530 0 ][ 968 0 ] [-----][-----][-----][-----]
6 5  [2867 0 ][-1k! 0 ] [ 776 0 ][-1k! 0 ] [ 938 0 ][2020 0 ] [-----][-----][-----][-----]
8 7  [2184 0 ][-365 0 ] [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [2294 0 ][-706 0 ] [-----][-----][-----][-----]
10 9 [2303 0 ][-602 0 ] [1336 0 ][1377 0 ] [2831 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]
12 11 [ 406 0 ][2843 0 ] [-457 0 ][-885 0 ] [2780 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]
14 13 [-64 0 ][2372 0 ] [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [1761 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]
16 15 [-1k! 0 ][ 282 0 ] [-1k! 0 ][-1k! 0 ] [2548 0 ][-1k! 0 ] [-----][-----][-----][-----]

RING 5          RING 4          RING 3          RING 2          RING 1
-----
l) Load global configuration | n) Set back all preamps to nominal | d) Global bias shift | [ LEGEND ]
s) Save global configuration | r) Set Preamp Ranges (all) | b) Set global bias | displaying: [current errors icon]
1.0) Ramp up/down all preamps | R) Set range for some preamps | y) see temperature log | [ ]:HV OFF [ ]:HV ON
c) Select displayed params. | t) Print report | j) see configuration log | icon:~ramping ~errors ~high leakage
p) Select preamp | x) Exit | $) Bias scan

Status: [.] last update: 0 secs ago ( 4 s) comms: Kenny:[OK] butters:[OK] daqCtrl:[OK]

```

Figura 2.8: Captura de pantalla del menú principal de la aplicación de consola.

Fundamentalmente, tiene 2 cometidos importantes. Por una parte, visualizar el estado de CALIFA, resumiendo sus parámetros de forma que se pueda entender el estado y problemas del detector y, por otra, permitir el control de todos los parámetros, indicando en cada momento posibles errores. Además, contiene los procedimientos para generar la rampa de voltajes necesaria para realizar el Bias Scan durante el ajuste de ganancia (ver 3.4)

El menú principal visualiza el estado general de CALIFA y permite colocar el detector en una de las configuraciones globales deseadas. Sus funciones son:

- Activar/desactivar el voltaje de los detectores.
- Seleccionar un preamplificador para acceder a los parámetros individuales.

HALF:1 RING:4 POS:2

Temperature: 26.28
Range: (front)!
Leakage (nA): <-1k
HV: OFF
Errors:
1234567890123456

Compensation params:
offset: 128 slope: 68
Max Bias: 0.0V

1) Ramp-up high voltage
0) Ramp-down high voltage
s) Scale all biases
D) Increase/decrease all biases
m) Change range of preamp
r) Refresh
d) increase/dec sing. xtal
c) view xtal
i) change bias of one xtal
n) save this biases to nominal
b) go back to nominal biases
a) set all biases to a value
x) Exit

[01]	[02]	[03]	[04]
Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 200.0 *
sto:340.6 hama:355.5	sto:358.7 hama:355.5	sto:354.7 hama:355.5	sto:350.8 hama:355.5
xtal:1823 apd:1021	xtal:1824 apd:1450	xtal:1819 apd:1254	xtal:1820 apd:1019
sfp: 0 board:13 ch: 6	sfp: 0 board:13 ch: 5	sfp: 0 board:13 ch: 4	sfp: 0 board:13 ch: 3

[05]	[06]	[07]	[08]
Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *
sto:345.8 hama:355.5	sto:349.4 hama:355.5	sto:356.4 hama:355.5	sto:374.2 hama:355.5
xtal:1822 apd:1077	xtal:1821 apd:1227	xtal:1818 apd:1465	xtal:1817 apd: 55
sfp: 0 board:13 ch: 2	sfp: 0 board:13 ch: 1	sfp: 0 board:13 ch: 0	sfp: 0 board:13 ch: 7

[09]	[10]	[11]	[12]
Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *
sto:377.6 hama:355.5	sto:374.0 hama:355.5	sto:350.0 hama:355.5	sto:358.7 hama:355.5
xtal:1951 apd: 49	xtal:1952 apd: 57	xtal:1947 apd:1020	xtal:1948 apd:1010
sfp: 0 board:13 ch: 8	sfp: 0 board:13 ch:15	sfp: 0 board:13 ch:14	sfp: 0 board:13 ch:13

[13]	[14]	[15]	[16]
Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *	Bias: 0.0 *
sto:380.7 hama:355.5	sto:384.4 hama:355.5	sto:355.3 hama:355.5	sto:351.9 hama:355.5
xtal:1950 apd: 33	xtal:1949 apd: 90	xtal:1946 apd:1015	xtal:1945 apd: 985
sfp: 0 board:13 ch:13	sfp: 0 board:13 ch:11	sfp: 0 board:13 ch:10	sfp: 0 board:13 ch: 9

Figura 2.9: Captura de pantalla de la aplicación de consola, menú para un preamplificador determinado (en este caso, Anillo 4, posición 2).

- Visualizar en una sola pantalla la información mas relevante de CALIFA, incluyendo corriente de fuga por módulo, temperatura, rango y errores.
- Gestionar las diferentes configuraciones, permitiendo cargar y guardar en ficheros.

Desde aquí se puede acceder a un menú individual para cada preamplificador, que permite cambiar individualmente el voltaje del APD de cada cristal individual, ver la corriente de fuga, la temperatura y los parámetros de compensación. Si se modifica alguno de estos parámetros, aparecerán en un color diferente para resaltar que se ha modificado la configuración nominal. Estos cambios pueden ser incorporados luego en la configuración, salvando el estado de CALIFA en el menú principal.

2.7.1. Estructura interna de la aplicación

La aplicación de consola utiliza una abstracción para simplificar la programación: preamplificadores virtuales. En el programa, hay un objeto **Califa** que contiene a su vez, 172 objetos **Preamp**, de forma que la aplicación puede leer y escribir datos en ellos sin preocuparse de latencias, tiempo de haz permitido, etc. El objeto **Califa** es el único objeto con el que interactúa la capa superior (interactiva) de la aplicación. Califa se comporta como un detector virtual, proporcionando una interfaz cómoda para la programación, con funciones como:

- **RampUp(half)**: coloca el alto voltaje en una mitad.
- **getPramp(half, ring, address)** Devuelve un objeto preamplificador.

- `revertBiases()` devuelve todos los voltajes de los detectores al último valor salvado.
- `globalShift(deltaV)` modifica los valores de voltajes de todos los detectores.
- `setRange(preamps)` cambia el rango dinámico de los preamplificadores designados en la lista *preamps*.

, entre otras (ver [Per21])

Internamente, cada amplificador virtual, contiene una interfaz de comunicación con el controlador previamente descrito en la sección 2.6.1. Esta interfaz puede ser de tres tipos:

- XMLRPC, comunicándose con los controladores alternativos a través de este protocolo.
- EPICS, para comunicarse con controladores IOC, (actualmente en desarrollo).
- Nula (o *dummy*) utilizada para todas aquellas posiciones en las que CALIFA no tiene todavía centelleadores.

Los detalles de la comunicación con los controladores no son visibles para la capa superior de la aplicación. La aplicación se limita a cambiar o leer valores de los preamplificadores virtuales. Estas lecturas devuelven resultados inmediatos, que pueden ser una copia en memoria de lecturas anteriores. Con esto se evita tiempo de espera de lectura en la aplicación, y llamadas repetidas. Este sistema de memorias intermedias se explica mas adelante en 2.7.2

2.7.2. Particularidades del funcionamiento de la aplicación

En el caso de un detector tan complejo como CALIFA, la función simple de colocar el voltaje correcto en los detectores individuales, por ejemplo, alberga detalles derivados de limitaciones de la electrónica que requieren una solución por parte de la aplicación de control. Aquí se detallan algunos:

Polarización de los APDs en 2 pasos

Durante los tests con la estructura de pétalos se observó que algunos APDs servidos por Hamamatsu [Hama] en la primera remesa presentaban algún tipo de

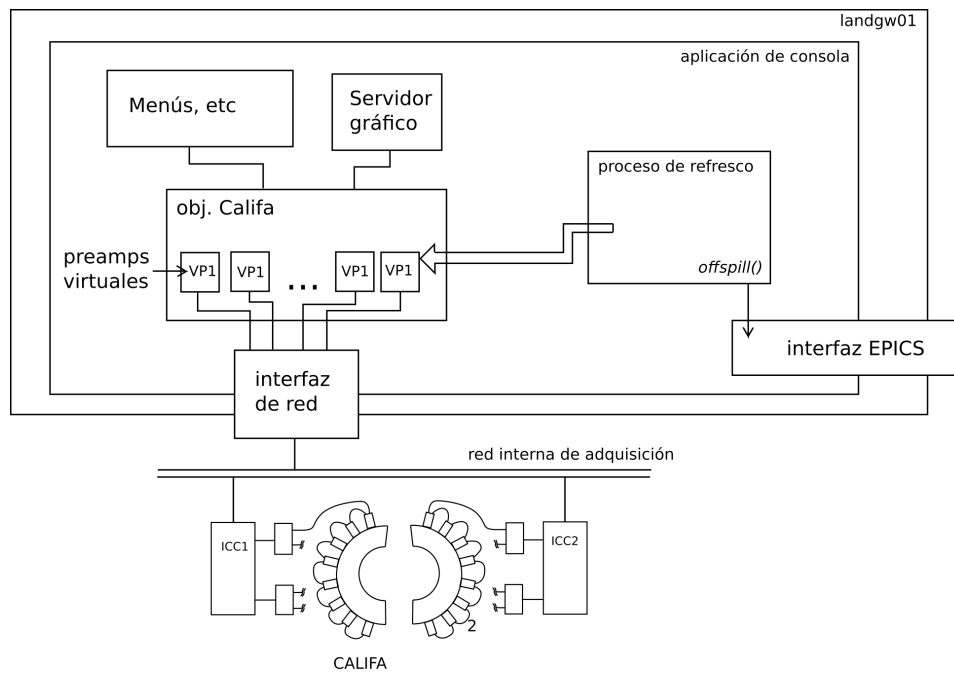


Figura 2.10: Estructura interna de la aplicación de línea de comandos.

defecto. En primer lugar, necesitan voltajes inusualmente altos (mayores de 400 V, cuando el resto ronda los 350 V). Además, un intento de polarizarlos directamente a su voltaje final (utilizando la rampa por defecto de los preamplificadores, en torno a 20V/s), resulta en una corriente de fuga muy alta que no decrece y, de persistir durante varios minutos, puede dañar el APD. Probando, encontramos que había que polarizarlos en dos pasos, primero al valor intermedio arbitrario de 350V y, tras esperar 20 segundos, a su valor final.

Esto invalida los mecanismos de rampa instalados en la electrónica de los preamplificadores, y la facilidad de colocar los valores y dejar a las fuentes de voltaje que generen la rampa automáticamente, por lo que para poner CALIFA en disposición de medida, hay que utilizar este procedimiento, en dos pasos, en vez de colocar el punto de control y delegar en las rampas generadas por las fuentes de voltaje de los preamplificadores, según el diseño inicial.

Relacionado con esto, sabemos que los APDs no toleran ningún cambio abrupto superior a 20V, y los preamplificadores no generan rampas si se cambia el valor del voltaje estando el voltaje ya aplicado, por lo que cualquier cambio mayor ha de partirse en pequeños pasos. Esto, de nuevo, hace que ante cambios en el voltaje de un detector, una vez que CALIFA está con voltaje, sea necesario implementar ese proceso mediante software.

Tiempo de lectura y utilización de memorias intermedias (*cachés*)

El bus de control de los amplificadores de Mesyttec es especialmente ruidoso y, a pesar de estar terminado con 50Ω (equivalente a la impedancia lineal del cable, y que debería absorber la onda de la señal), no puede funcionar a la velocidad nominal. Tras muchas pruebas, observamos con el osciloscopio que se producían rebotes de la señal, (bien en el final del bus o bien en la entrada de algún preamplificador) que afectaban a la respuesta de los preamplificadores al comando recién mandado. Por tanto, además de limitar la transmisión a 9600 Bps, se introduce artificialmente un retraso de 0.05s entre comando y respuesta. Esto tiene dos implicaciones:

- Hace de la escritura de todos los parámetros de CALIFA, algo necesario en varias ocasiones durante el experimento, un proceso extremadamente largo (del orden de minutos). Incluso la lectura del número mínimo de parámetros, necesaria para monitorizar CALIFA continuamente durante la toma de datos, que comprende temperatura, testigos (*flags*) de errores y corrientes, lleva mas de un minuto para todo CALIFA. Debido a la interferencia entre lectura y toma de datos, estas lecturas han de ser repartidas en varios bloques.
- Durante el experimento, se desea leer el mínimo número de veces. En concreto, se necesita un control para acceder a CALIFA únicamente durante el tiempo en el que no hay haz de partículas (llamado Offspill). Afortunadamente, la dinámica de agrupación (*bunching*) del haz en los anillos del acelerador produce haces pulsados con periodos de varios segundos, y hay una señal electrónica que indica el tiempo onspill/offspill, que es monitorizada por una variable del sistema EPICS de R3B, por lo que la aplicación puede beneficiarse de su lectura y leer/escribir solo durante el tiempo correcto (sección 2.7.2).

Para solucionar estos dos problemas, se utiliza un proceso concurrente llamado **proceso de refresco**. El proceso de refresco actúa en paralelo con la aplicación refrescando los valores de los preamplificadores virtuales de acuerdo con los valores reales de CALIFA, y escribiendo en CALIFA progresivamente, sin bloquear la aplicación, y únicamente cuando las condiciones del haz lo permitan, es decir, entre pulsos de partículas. Los detalles del sistema de escritura fuera de pulso (en *offspill*) y el proceso de refresco, se detallan en las dos próximas secciones.

Lectura y escritura entre pulsos del haz (*offspill*)

Por otro error de diseño de los preamplificadores, la sección digital de control de bus de los preamplificadores introduce ruido en los circuitos analógicos de medida.

Esto es un problema de la electrónica interna de los preamplificadores, que genera una interferencia (*cross-talk*) entre el bus digital y la tierra de la sección analógica del circuito (ver figura 2.3) ⁸.

Por tanto, un intento de leer o escribir en un registro mientras se están tomando datos altera completamente la medida de los 16 canales del preamplificador. Si se leyeran o escribieran valores en CALIFA continuamente, como es el caso durante un experimento, donde se monitorizan las corrientes de fuga y la temperatura constantemente, invalidaríamos los datos tomados.

Afortunadamente, ya que el haz viene agrupado en periodos de entre 1 y 5 segundos, con un porcentaje activo del ciclo de aproximadamente el 70 % la solución es intentar leer o escribir en CALIFA únicamente durante esos intervalos en los que no llegan partículas. Cada pulso se denomina *spill* y las dos fases, *onspill* (tiempo durante el cual llegan partículas al blanco) y *offspill*, respectivamente.

El FRS proporciona una señal NIM indicando $onspill/offspill$, que es convertida a una variable EPICS en R3B. La estrategia es leer esa variable para poder saber cuando se puede comenzar a tomar datos. Sin embargo, la lectura de esa variable lleva tiempo y además se debe minimizar el número de consultas a la plataforma para no saturarla.

Además, los periodos de haz y su fracción son variables entre experimentos e incluso dentro del experimento, por lo que no es posible predecir, a priori, un tiempo seguro de lectura desde que se detecta el indicador de offspill.

La aplicación, por tanto, puede leer la variable para saber en que estado se encuentra. Como la lectura se realiza accediendo periódicamente a un valor en la plataforma EPICS y para no saturar con peticiones, se ha diseñado un algoritmo para poder estimar los periodos de tiempo permitidos para leer, con la menor información posible.

El tiempo elegido entre lecturas del valor variable offspill es un compromiso entre tener información actualizada y no saturar la plataforma EPICS y, actualmente la forma de seguir la estructura de los pulsos es interrogando este valor 3 veces por segundo ⁹.

⁸Muy recientemente, Mesytec ha determinado las condiciones bajo las que se genera el ruido, y en el futuro podremos modificar la aplicación para incorporar esta mejora.

⁹En el futuro, se prevé registrar alguna función tipo *callback*, de forma que EPICS informe ante un cambio de estado de la variable, pero esta solución no ha sido implementada por el momento

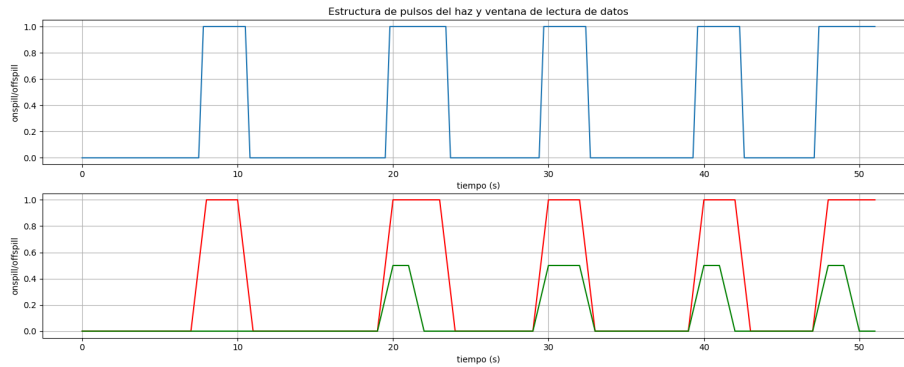


Figura 2.11: Distribución de los pulsos, tal y como los captura la aplicación. En verde, se puede ver el tiempo que dedica a la lectura/escritura.

Los pulsos de haz no son completamente periódicos. El haz viene agrupado en un pulso de duración variable, que se repite cada aproximadamente 10 segundos; pero esto puede variar mucho entre experimentos. Como el periodo activo de cada *pulso* es diferente y oscila entre 2 y 5 segundos, la aplicación intenta estimar la duración del pulso siguiente basada en el último. Para ello, captura la duración del *offspill* del último periodo y asume que el siguiente será parecido, pero se limita a leer o escribir durante el 60 % de la duración esperada del *offspill* actual, para permitir la variación aleatoria con la que se presentan.

El código para este cálculo está integrado en el proceso de refresco, y se puede ver en la siguiente sección.

2.7.3. Proceso de refresco

Como colocar todos los parámetros en CALIFA tarda aproximadamente 200 segundos (alrededor de 3 minutos) y afecta a las señales si la adquisición está funcionando en ese momento, se necesitan estrategias para que esto no afecte a la operación: intentar minimizar el número de accesos a los preamplificadores, y realizar el proceso de lectura/escritura concurrentemente con la aplicación principal, de forma que el usuario no perciba ningún retraso.

Esta es la función del **proceso de refresco**, una rutina de refresco automático de los valores de los preamplificadores virtuales, que corre en un proceso paralelo, de manera concurrente con la aplicación. El proceso de refresco se ejecuta realmente

en un hilo (ing. “*thread*”)¹⁰.

A continuación se explica una parte del código que lo gestiona. El programa completo se puede acceder en [Per21]

El proceso de refresco consta de una única función, `run()` que se limita a repetir un bucle hasta el cierre de la aplicación. Dentro del cuerpo del bucle, la primera acción es hacer hacer una copia de todos los preamplificadores virtuales controlados. Esta copia de trabajo servirá para llevar la cuenta de los últimos actualizados. A continuación, llama a la función `round()` que actualizará tantos de ellos como sera posible durante un periodo sin haz (*offspill*), retirándolos de la lista `preampsRemaining` según los actualiza.

Esta función puede acabar por dos razones: o bien la lista de preamplificadores virtuales por refrescar está vacía, o bien se ha acabado el *offspill*. En el primer caso, el bucle de la función `round()` vuelve a crear la lista y empieza la ronda de nuevo. En el segundo caso, la siguiente llamada a `round` en el próximo *offspill*, continuará con el refresco de los preamplificadores en el punto en el que interrumpió, gracias a la información contenida en la lista `preampsRemaining`. A continuación se puede ver un extracto del código relevante, que incorpora el código de predicción de la duración del *onspill*.

```
1      def waitOffspill(self):
2          """
3          """
4          while not epics.readVarBoolean("R3B.SFRS.LCC2V2.OFFSPILL")
5              ↪ :
6              time.sleep(0.6);
7
8      def run(self):
9          """
10         """
11
12         while not self._stop:
13
14             self.vPreampsRemaining = self.vPreamps[:]
15             # refresh the list of interfaces to work with,
```

¹⁰La diferencia entre *hilo* y *proceso* es que un proceso no puede acceder directamente a los datos de otro proceso, mientras que los hilos ejecutan en el mismo espacio de memoria de un proceso [RH04].

```

16         # to start over another round
17
18     while self.vPreampsRemaining != []:
19         ## 1) waits for an offspill
20
21         self.waitOffspill()
22         limit = time.time() + self.lastOffSpill * 0.6
23         # calc the time limit for this part of the
24             ↪ round
25         self.round(limit)
26
27         # this point is reached if the offspill time limit is
28             ↪ over, or
29         # the round has finished
30
31         time.sleep(0.5)
32
33     print ("controller finished")

```

En cuanto a la función `round()`, sencillamente va refrescando uno a uno los preamplificadores virtuales hasta que la lista está vacía, o se acaba el límite de tiempo marcado. El código es el siguiente (En este listado del código para la memoria, se han omitido algunas instrucciones no relevantes para el algoritmo: el código completo se puede encontrar en [Per21]).

```

1
2     def round(self, limit):
3         """
4         @param limit time limit (in seconds UTC) for this round
5         """
6
7         self.lastRoundTime = time.time()
8         self.nRound += 1
9
10        # 1) keep changing biases until time is over or
11        while self.vPreampsRemaining != []:
12
13            vp = self.vPreampsRemaining.pop(0)
14            if now() > limit: return

```

```

15
16         if vp.getDifference() == 0:
17             continue
18
19         for biasRegister in range(16):
20
21             # 1) change Preamp biases, according with
22             # desired bias
23
24             #-----
25             ↪
26             # codigo omitido, relacionado con la generacion de
27             # rampas, ver la seccion siguiente
28             #-----
29             ↪
30
31             # 2) update read some global parameters from
32             ↪ preamp
33             for channel in [REG_SUMCURRENT, REG_TEMP, REG_HV,
34                             ↪ REG_ERRORCODE]:
35                 vp.readParam(channel)

```

Generación de cambios progresivos de voltaje

El proceso de refresco tiene finalmente otra función, que es la de generar rampas cuando se cambian voltajes individuales. Cuando un preamplificador virtual recibe el comando de cambiar uno o varios voltajes de los APDs, no manda ningún comando al controlador correspondiente en CALIFA: se limita a registrar el voltaje deseado en un *array*.

El proceso de refresco, va comprobando esos valores frente a los reales en todos los preamplificadores virtuales y cuando percibe una diferencia entre el voltaje deseado y el real, manda los comandos reales al controlador de CALIFA para modificar el voltaje un intervalo pequeño prefijado. Esto ocurre con un ritmo tal que las rampas generadas sean siempre menores de 20 V/s. La función principal implicada es `round()`


```
2         for biasRegister in range(16):
3             current = vp.currentBias[biasRegister]
4             desired = vp.desiredBias[biasRegister]
5             last = vp.lastChange[biasRegister]
6             now = time.time()
7
8             if desired == 0: continue
9             if (now - last) < REFRESH_FREQ: continue
10
11             # 2) if HV is off, set at once
12
13             if vp.readParam(REG_HV) == "down":
14                 vp._write(biasRegister, desired)
15                 continue
16
17             # 3) else, proceed in steps
18
19             difference = desired - current
20             if difference == 0: continue
21
22             if (difference > STEP) : difference = STEP
23             if difference < -STEP: difference = -STEP
24             current += difference
```

Valores en el arranque de la aplicación

Si bien CALIFA cambia sus parámetros durante los experimentos, para cada uno existe una configuración básica por defecto, que se considera la adecuada. Esta configuración contiene los valores correctos para la compensación de temperatura, y los voltajes adecuados para detector de forma que sus ganancias sean iguales. Esta es la configuración base de un experimento. Sin embargo, en muchas ocasiones durante la preparación del experimento, CALIFA contiene otros valores provisionales. Debido al peligro de cambiar voltajes abruptamente, la aplicación no carga ninguna configuración global de CALIFA cuando arranca, limitándose únicamente a mostrar los valores actuales de voltaje en cada detector, junto con el voltaje prescrito por la configuración por defecto. Una opción permite actualizar CALIFA a la configuración actual. Los parámetros de cada cristal (o los preamplificadores completos en el menú principal) se muestran de un color diferente (amarillo) si tienen valores diferentes a

los de la configuración de CALIFA en ese momento.

2.8. Interfaz gráfica

Para crear una interfaz gráfica de usuario, se valoraron varias posibilidades:

- MEMS, estándar de EPICS.
- un GUI tradicional, como aplicación local en `landgw01`.
- un GUI basado en explorador, accesible desde cualquier ordenador externo, como un servicio Web.

De todas estas opciones se escogió la tercera por las siguientes razones:

En primer lugar, MEMS, la librería estándar de EPICS para construir interfaces gráficas, ha llegado al final de su vida útil y no está soportado por la comunidad EPICS. Además, está completamente ligado a la plataforma EPICS y durante las fases iniciales no se ha utilizado un controlador compatible.

Inicialmente, se construyó un prototipo del GUI tradicional: una aplicación que se ejecutaba en el ordenador de control `landgw01` y mostraba de manera gráfica los valores relevantes, permitiendo agrupar cristales y/o preamplificadores, y modificar los valores usando principalmente el ratón. Sin embargo con la llegada de la pandemia, el personal presente hubo de reducirse al mínimo y los encargados de CALIFA tuvimos de realizar los turnos remotos. En ese momento, se dispuso solo de la consola de texto, y surgió la necesidad de ampliarlo de nuevo con una interfaz gráfica que pudiera ser controlada fácilmente desde cualquier lugar.

Por tanto, de manera semejante a otros programas que se usan en la colaboración R3B se decidió realizar una interfaz gráfica basada en un explorador Web cualquiera, usando HTML, Ajax (código javascript en una página que establece una comunicación independiente con el servidor para refrescar la página independientemente de las acciones del usuario) y llamadas remotas a la aplicación principal.

Puesto que la aplicación de consola ya contenía mucha de la lógica de proceso de los cristales (rampas de polarización, protecciones, lectura en *Offspill* etc), se decidió usar un parámetro de línea específico en la ejecución para que ésta funcionara a su vez de servidor para la aplicación gráfica. Así, invocando `"clicalifa -serve"` la aplicación pone en marcha el servidor web, a cuya interfaz se accede en la dirección local `127.0.0.1:13030`.

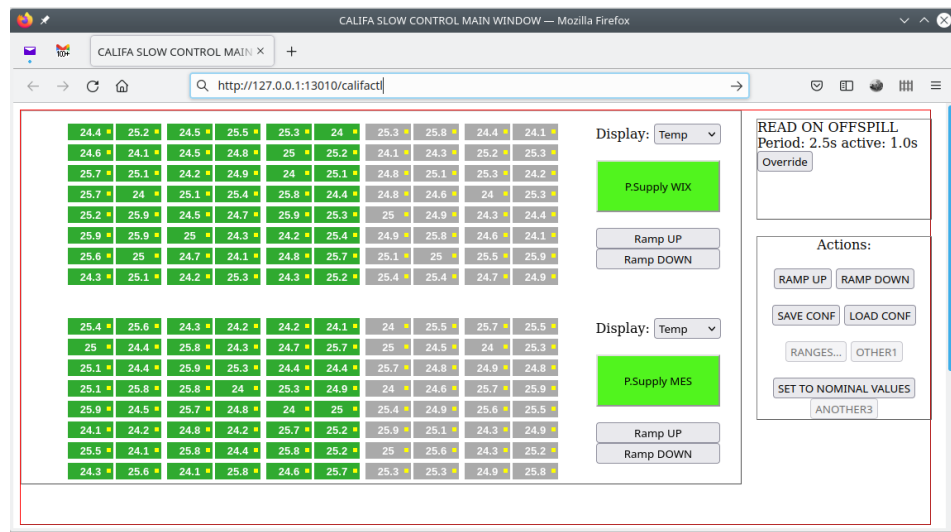


Figura 2.12: Captura de pantalla del menú principal de la aplicación gráfica, mostrando su ejecución en el explorador de internet.

Este servidor escucha en un puerto del ordenador `landgw0111`). El acceso es similar al de a una página web, con la particularidad de que muestra los detectores y permite seleccionar y cambiar los parámetros de manera similar a la consola de texto.

¹¹Por defecto el 13030, por supuesto existe la posibilidad de cambiar el puerto con la opción `-port`.

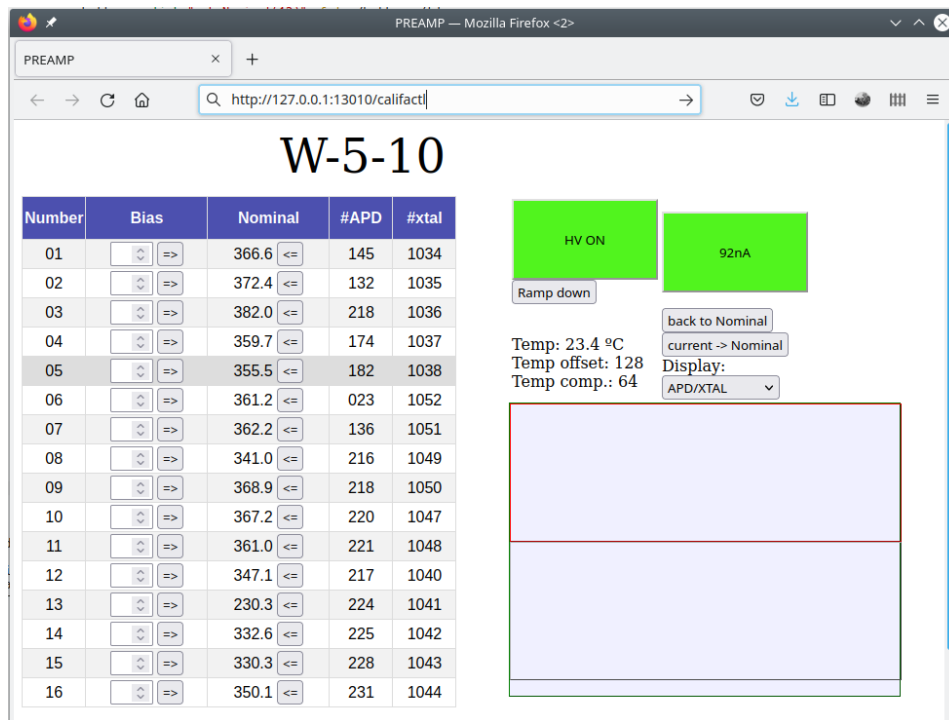


Figura 2.13: Captura de pantalla del menú de un preamplificador en la aplicación gráfica.

La seguridad está garantizada permitiendo únicamente el acceso desde direcciones que se consideran seguras. En este caso, la red 161.111.23.0, perteneciente al CSIC. Este acceso se configuró a mano para cada experimento dependiendo de quien iba a estar a cargo, y deberá ser flexibilizado en el futuro sin comprometer la seguridad del control.

2.9. Microlenguaje de control

Finalmente, motivado por comodidad personal para acometer cambios específicos requeridos durante los experimentos (por ejemplo, en s494 se decidió colocar en rango de protones o gammas alternativamente a los detectores, según su ángulo ϕ), así como operaciones complejas durante el montaje inicial de CALIFA (como mantener la cuenta de aquellos cristales con ruido, o aislar un cristal de un grupo bajando el voltaje para poder verificar cual es el responsable de una corriente de fuga alta en todo un bloque), y también para permitir que otros procesos pudieran colocar CALIFA en la configuración correcta, decidí implementar un microlenguaje de control, en forma de una tercera aplicación que acepta una sentencia, un programa, o de forma interactiva. En este caso, ante el símbolo de sistema (*prompt*), el usuario teclea comandos o peticiones sobre CALIFA. Por ejemplo, desde la consola

de comandos de Linux, un usuario puede querer activar (colocar los voltajes) en una mitad del detector, y conocer la temperatura mediante dos comandos diferentes :

```
~/califa/ctl > califactl rampup wixhausen
Wixhausen half ramped-up (104.93s)
~/califa/ctl > califactl temp wixhausen?
Temperature in group Wixhausen:
  Average: 23.4C
  Max:31.2C
  Min:-16C
Group statstts: 1320 elements
```

O, puede abrir una sesión interactiva:

```
~/califa/ctl> califactl
-----
califactl v1.3
a.perea@csic.es
-----
Interactive mode
> califactl rampup Wixhausen
Wixhausen half ramped-up, (103.23s)
> califactl rampdown WR8P10..12
Preamps WR8P10, WR8P11, WR8P12 ramped down (2.4s)
>
```

Este lenguaje ofrece algo más que la ejecución de comandos para activar y desactivar el detector. En muchas ocasiones durante el setup ha sido necesario aislar un grupo de preamplificadores para trabajar con ellos, bien fuera por que contenían canales con problemas, o porque eran recientes adiciones al detector completo. Con `califactl` se pueden definir grupos de cristales con los que se puede trabajar como con el detector completo.

2.9.1. Designación de cristales y grupos

En este lenguaje se han establecido unas reglas para referir a uno o mas cristales:

- **CALIFA**, **califa**, **cal**: Refiere al detector completo ¹².

¹²Operaciones sobre todo califa o una mitad requieren confirmación adicional del usuario.

- **Wixhausen**, **wix**: la mitad 1 , (derecha, llamada "*Wixhausen*").
- **Messel**, **mes**: la mitad 2 (izquierda, llamada "*Messel*").
- **[mitad]R[anillo]P[preamp].[XTAL]** : Un preamplificador/xtal determinado con Nomenclatura de control (ver 2.4.1): Si se omite la parte de **XTAL** se sobreentiende todo el preamplificador (los 16 cristales).

Por ejemplo: **WR3P12.10** refiere al detector 10 del preamplificador 12 del anillo 3 en la mitad derecha.

- Similarmente, usando la nomenclatura de adquisición (ver 2.4.1).
[mitad]S[sfp]B[board].[channel], donde **sfp** es el PEXOR (las tarjetas de adquisición se agrupan física y lógicamente en bloques de 16), y **board** es el número de tarjeta del front-end.
- **[X]..[Y]**: Para referir un **rango** de cristales (o anillos, preamplificadores, SFPs, tarjetas).
- **[X],[Y]...,[Z]**: Para referir un **grupo** (explícitamente definido) de cristales (o anillos, preamplificadores, SFPs, tarjetas).

Por ejemplo:

WS0..3B14 refiere a todos los cristales de las tarjetas 14 en cada una de las 4 SFPs (Es decir a $16 \times 4 = 64$ cristales).

WR2,4P1,3,5.3 refiere a los cristales número 3 de los preamplificadores 1,3 y 5 en los anillos 2 y 4, por tanto a $2 \times 3 = 6$ cristales.

2.9.2. Comandos disponibles

Se dispone de varios comandos tanto para crear grupos de cristales adaptados a las necesidades del experimento, que puedan ser controlados en bloque, como para cambiar voltajes de manera general. Estos comandos se fueron desarrollando según se necesitaban, principalmente durante la fase de ajuste de ganancia y arreglo de cristales defectuosos, que es el momento en el que mas flexibilidad de control se requiere para CALIFA. Aquí se listan algunos. En A hay una lista completa.

- **temperature?**: lee la temperatura de un grupo. en el caso de que haya mas de un cristal, devuelve la temperatura media, máxima y mínima.
- **rampup**: conecta el alto voltaje en el preamplificador/grupo seleccionado. Solo acepta preamplificadores, o grupos de éstos (es decir, **califa**, **wixhausen**, **messel**, y grupos).

- **rampdown**: desconecta el alto voltaje en el preamplificador/grupo seleccionado.
- **hv?**: consulta el estado de voltaje en el preamplificador o grupo seleccionado. En el caso de un grupo, si hay discrepancias, devuelve una lista con el estado de cada uno.
- **group [name] [seleccionados]** crea un grupo con el nombre [name] con los cristales seleccionados.

2.9.3. Estructura interna del intérprete del microlenguaje

Sin entrar en demasiados detalles técnicos, la estructura es la de un intérprete sencillo. La sentencia o el script son parseados por un analizador léxico que convierte las cadenas que componen los comandos y parámetros en números o constantes, y luego analizado por un parser de tipo LL(1) que dada la gramática, genera un árbol semántico. La ejecución de la sentencia o el script ocurre recorriendo el árbol desde la raíz. En cada nodo, se realiza una acción sobre CALIFA.

Se adjunta una estructura simplificada de la gramática (se han omitido reglas cuyo único objetivo es la ejecución de acciones necesarias para la interpretación del comando, pero sin información para la gramática). La gramática completa, desarrollada para el generador de lenguajes YAPPS [Pat05] puede ser encontrado en el [Per21]

```
1
2 token ASK : "?"
3 DOTDOT = ".."
4 INT = r"[0-9]+"
5 HALF = r"W|M|1|2|L|R"
6 COMMA = ","
7 DOT = "."
8 IDENTIFIER = r"[a-zA-Z][a-zA-Z0-9]+"
9 VALUE = r"[a-zA-Z][a-zA-Z0-9]+"
10
11 code -> sentence*
12
13 sentence -> getSentence | setSentence
14
15 getSentence -> parameter ASK | "get" parameter
16
```

```
17 setSentence -> "set" group VALUE
18
19 parameter = group "DOT" IDENTIFIER
20
21 group = HALF (controlGroup | acqGroup)
22
23 acqGroup = "S" group "B" group DOT group
24
25 ctrlGroup = "R" ring "P" group DOT group
26
27 group = itemRange | itemList
28
29 itemGroup = INT ( COMMA INT)*
30
31 itemRange = INT DOTDOT INT
```


Capítulo 3

AJUSTE DE GANANCIA

3.1. Introducción: El ajuste de ganancia

El análisis de un experimento en R3B conlleva varios meses de análisis tras la toma de datos, hasta que se pueden visualizar algunos de los resultados preliminares. El primer paso de este análisis es una calibración de todos los detectores, de forma que se puedan agrupar y sumar los datos recogidos en cada uno de los detectores. No obstante, durante la toma de datos del experimento es importante poder comprobar que el experimento se está desarrollando correctamente y que los datos recogidos son de interés físico. Este análisis en línea (ing. “*online analysis*”) comprende comprobaciones y chequeos particulares de cada detector, además de un breve análisis de datos.

Para CALIFA, el tipo de análisis en línea depende de cada experimento, pero en todos ellos es necesario poder distinguir los productos de uno o varios canales de reacción en un histograma de energías. Como CALIFA está compuesto por muchos cristales individuales, es necesario sumar sus contribuciones y para eso hay que ajustarlos de manera que presenten la misma ganancia durante el experimento. El procedimiento se llama **ajuste de ganancia** (ing. *gain-matching*) para distinguirlo de la calibración propia, realizada en etapas posteriores del análisis. El ajuste de

ganancia y la calibración tienen, además, una naturaleza un tanto diferente por las siguientes razones:

- En primer lugar, es importante precisar que el objetivo del proceso de ajuste de ganancia es fundamentalmente diferente al de una calibración. El ajuste de ganancia modifica los *parámetros* del detector para conseguir una sensibilidad uniforme para todos los cristales, ajustando su respuesta a un común, mientras que la calibración se realiza en el nivel de análisis de energías, sobre datos ya adquiridos y, por tanto sujetos a una digitalización y a unos límites, y no afecta al rango dinámico: un mal ajuste en ganancia puede dejar algunos cristales sensibles a rangos de energía no adecuados para el experimento, de una manera que la calibración no podrá solucionar luego, porque algunas energías serán superiores (o inferiores) al rango elegido del detector y, quedan por debajo del Umbral, o registradas erróneamente en la región de saturación. Nótese que para aprovechar la resolución del ADC, la ganancia de los detectores se sitúa de forma que la energía mas alta de interés en el experimento quede digitalizada con el máximo valor: por lo que desviaciones pequeñas de la ganancia pueden conducir a la pérdida de información importante.
- Durante el tiempo de medida, el análisis en línea (*Online analysis*) requiere la agrupación de varios cristales (normalmente físicamente contiguos en el detector), para poder *conseguir una estadística suficiente en el menor tiempo posible*, y de esta manera poder ver la física del experimento y tomar decisiones en tiempo real sobre que hacer durante el tiempo de toma de datos. En estos experimentos en particular (por ejemplo, S454. Ver 1.7.2), se buscan picos sólo de protones o de gamas a las energías que se esperan de la reacción, y sin una precalibración, no se podría observar ninguna estructura en los datos, puesto que la dispersión ocasionada por la mala calibración aplana cualquier pico hasta niveles indistinguibles del fondo.
- Los programas de calibración del sistema principal, realizados dentro del marco de R3BRoot (la plataforma de análisis para los experimentos de R3B desarrollada a partir de FairRoot el estándar para R3B, [Colb], [Cola]), funcionan mejor y se evitan errores (en forma de soluciones que no convergen) si los datos están ya aproximadamente calibrados: fundamentalmente se facilita la detección de picos, al poder encontrarlos en una región determinada. Este ajuste de ganancia permite, además, traer a la región de calibración detectores anómalos con ganancias muy superiores o inferiores a la media, ya sea por tratarse de un cristal con luminosidad diferente, mala interfaz cristal-APD o algún otro problema en la conexión eléctrica (ver [3.2]).

- En los primeros experimentos (S444, 2018/19 1.7.1), la calibración en el sistema de análisis [Colb], no estaba aún funcionando correctamente, por lo que muchos análisis posteriores se realizaron usando algoritmos de calibración *ad hoc* y poco robustos, que necesitaban una precalibración para poder realizar la calibración.

La calibración real se realiza posteriormente con dos métodos complementarios: Primero, antes de un experimento, se realiza una toma de datos en vacío. CALIFA es suficientemente sensible como para registrar los muones de los rayos cósmicos que alcanzan la superficie terrestre. Dado que la mayoría de los muones proceden de una dirección azimutal, y a las energías involucradas, son partículas mínimamente ionizantes (MIP, “*minimum ionizing particle*”), y depositan una cantidad de energía constante por unidad de longitud, así como el hecho de que al atravesar CALIFA interactuarán con dos cristales opuestos con respecto al eje del detector, se puede determinar la trayectoria seguida a través de varios cristales y la energía depositada, que dependerá solo de la cantidad de material atravesado. De ahí es posible sacar una calibración con deposiciones de energía de cientos de MeV, y por tanto, mucho mas precisa que la obtenida con las fuentes radioactivas encapsuladas, puesto que no es necesaria una extrapolación severa. Posteriormente, durante el experimento se toman unas series de datos con reacciones conocidas para poder afinar esa calibración durante el análisis posterior.

3.2. Errores en los APDs

Además de lo ya explicado, el ajuste de ganancia ha demostrado ser una herramienta muy valiosa para la detección de anomalías en cristales/detectores. Conseguir la convergencia de todos los detectores a una posición de pico para una fuente de calibración funciona como la primera prueba básica del estado del detector. Durante la preparación de los experimentos S444 y S454, el procedimiento de ajuste de ganancia se realizó paralelamente a la depuración de todos los errores en los cristales de CALIFA. En el experimento S444, con únicamente una mitad del detector CALIFA funcionando, quedaron finalmente 20 cristales con errores, mientras que para el s454, redujimos ese valor a 12 cristales en la mitad derecha (Wixhausen) y tan solo 3 en la izquierda (Messel). En todos estos procesos, el ajuste de ganancia servía como banco de pruebas para comprobar el funcionamiento correcto de cada detector y su canal de electrónica.

Sin embargo, esa misma utilidad complicaba los programas de análisis, puesto

que de debían ser suficientemente robustos para poder encontrar los picos del espectro de la fuente de cobalto, aún cuando el canal presentara errores significativos, como un voltaje inadecuado. Las diferencias entre APDs, incluso dentro de la misma serie de producción (condición impuesta a *Hamamatsu* para mejorar la uniformidad entre APDs), hacen que si un detector toma el valor de polarización de otro, queda completamente fuera de rango.

En los experimentos S454 (1.7.2 y 1.7.3) , encontramos que aunque este no es el caso general, los errores de montaje afectaban a varias decenas de cristales en cada mitad del detector. En algunos casos, estos casos extremos escaparon incluso al algoritmo de ajuste de ganancia y hubieron de ser llevados manualmente al rango correcto, para luego poder entrar en el flujo de datos del ajuste de ganancia. Las razones para estas grandes desviaciones parecen venir de cuatro fuentes:

- Errores en las hojas de datos: dado que los diferentes detectores provienen de hasta 3 laboratorios diferentes, con tablas incompatibles entre sí que hubo que unificar.
- Errores en el emparejamiento cristal-APD, de forma que una posición no corresponde con el cristal y APD emparejados.
- Errores en el cableado o las conexiones internas.
- Finalmente, en algunos casos, se sospecha que hay alguna fuga menor en la conexión del cable con el APD. Dado el voltaje, en el rango de 300-400V, y las mínimas corrientes nominales en operación, unos 20 nA por cristal, las resistencias equivalentes son del orden de Gigaohmios: cualquier residuo en la placa de conexión puede representar una fuga superficial comparable a la corriente de operación. En un caso, que afectó a 4 cristales de una misma sección del detector, pudimos trazar el origen al uso de una cinta adhesiva inadecuada como la causa de la fuga. En otros casos, el problema parece estar en las soldaduras de una placa de distribución interna de cada alveolo: en este caso, volviendo a soldar estos contactos, el problema desapareció.

Es importante hacer notar que el sistema de alimentación no tiene ningún control del voltaje: no hay manera de diferenciar el voltaje deseado (el punto de operación) del voltaje que se está aplicando en realidad (*Read-back*), y la lectura de corriente es común para cada grupo de 16 cristales, lo que dificulta encontrar cristales defectuosos, a menos que tengan un comportamiento diferente durante la adquisición. Lamentablemente, en muchas ocasiones el ruido generado por un detector defectuoso bloqueaba completamente la adquisición de toda una mitad, haciendo imposible esta vía de identificación.

3.3. Ajuste de ganancia con el voltaje

Como ya se ha explicado en la introducción (ver sección 1.5), la dependencia con la temperatura se mantiene controlada mediante 2 sistemas: la inyección de nitrógeno en la cámara que resulta en una temperatura uniforme, y la característica de las fuentes de voltaje de los amplificadores que permite compensar la variación mediante un ajuste del voltaje suministrado a los detectores según varíe la temperatura. Ya se han indicado los rangos y los valores (ver capítulo 1, y basta con mencionar que estos parámetros, (pendiente y offset) son manejados por el sistema de control de parámetros.

Así que el parámetro que permite variar la ganancia de una manera repetible y estable en el tiempo es el voltaje de polarización de los APDs.

La esencia del procedimiento de ajuste de ganancia consiste, por tanto, en encontrar los voltajes adecuados para cada detector, de forma que al final todas las cadenas de adquisición tengan la misma ganancia, compensando las desviaciones individuales.

El procedimiento es sencillo: realizar un barrido en voltajes alrededor de un valor que se considere aceptable, anotando las posiciones del pico del espectro de una fuente de Cobalto, y luego modificarlos de forma que todos los cristales presenten espectros similares, con estos picos de calibración en el mismo canal del histograma.

Durante las pruebas, en la región de interés, encontramos que la variación de la ganancia con el voltaje se puede aproximar por $V_{peak} = A + B * V + C * V^2$. Esta función ha resultado ser mucho mas flexible que la original exponencial.

3.4. Procedimiento de ajuste de ganancia

Durante el primer experimento con CALIFA (en 2018, [Col17b]), diseñé este procedimiento para el experimento en preparación: mi contribución en esa campaña fue diseñar los programas de barrido de voltajes y control de la adquisición durante el ajuste de ganancia, y por otro lado, utilizando unos programas existentes (derivados de los usados en el banco de pruebas de linealidad de los cristales) hacerlos funcionar para todo el detector y coordinar su correspondencia (*“mapping”*) entre los resultados obtenidos, las tablas que se cargaban en los programas de control y que configuraban CALIFA y finalmente las tablas maestras, con los números de serie de cristales, APDs, y sus parámetros para todo el detector (por razones históricas, se

utilizan 2 sistemas de nomenclatura para los cristales y en ese momento no estaba estandarizado. Se adjunta una breve explicación en 2.4.1)

Sin embargo, estos programas modificados, no funcionaron como se esperaba, dejando aproximadamente 400 cristales (un 25 %) fuera de calibración y no consiguiendo una buena convergencia de muchos otros, por lo que tuvieron que ser ajustados a mano: Esto constituyó un proceso extremadamente tedioso que llevó varios días de trabajo ininterrumpido y contra reloj para poder preparar CALIFA a tiempo para el experimento.

Finalmente, en la campaña de marzo 2021 ([Kat20]), pude disponer del tiempo antes del experimento, para reescribir estos programas de modo tal que fue posible generar una calibración consistente para todos los cristales del detector.

Para realizar el ajuste de ganancia se utiliza una fuente de calibración de ^{60}Co . El ^{60}Co ($Z=27$) decae a ^{60}Ni ($Z=28$) con una vida media de 5.3 años, produciendo adicionalmente, un electrón, un antineutrino electrónico. El ^{60}Co ($5+$) puebla en 99.86 % un estado $4+$ a 2505.7 keV, que decae por el emisión de un gamma de 1173.2 al $2+$ y de este, al fundamental, emitiendo un segundo gamma de 1332.5 keV. Estas dos transiciones son consideradas de muy baja energía con respecto a los rangos dinámicos del experimento (el rango de detección es de 200MeV para protones y 100 MeV para gammas), otra razón por la que el ajuste de ganancia no puede eliminar la necesidad de una calibración.

El uso de fuentes encapsuladas como medio de calibración supone por tanto, una calibración preliminar: la calibración real se realiza con muones provenientes de rayos cósmicos, como ya se ha explicado 3.1

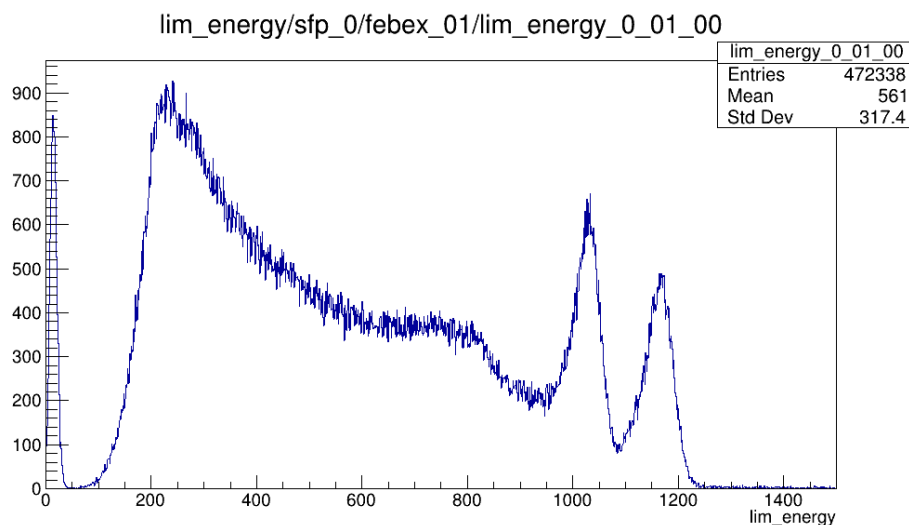


Figura 3.1: Espectro de la fuente de cobalto en un detector individual (Mitad 2, SFP0, Tarjeta 1, canal 1, situado en el anillo 3 de CALIFA. Se puede observar el pico de 1173 keV colocado en el canal 1000.

La idea básica del procedimiento de ajuste de ganancia, es tomar series de datos de una duración moderada cada una, con un desplazamiento del voltaje de polarización, común para todos los detectores, obteniendo un espectro para cada detector. Repitiendo este proceso en varios punto a lo largo de un intervalo alrededor del punto inicial de polarización, obtenemos, para cada detector, series de espectros, en los que los picos se desplazarán de acuerdo con la variación de ganancia con el voltaje de operación.

El paso siguiente es elegir una posición deseada común para los picos de estos espectros en todos los detectores y, finalmente, ajustar individualmente el voltaje de cada detector para que los picos se desplacen al canal elegido en el histograma.

Lamentablemente, en este algoritmo hay tantas fuentes de incertidumbre y errores externos al procedimiento, que la única manera de proceder es de manera iterativa, resolviendo los problemas hasta que la convergencia sea satisfactoria.

Las fuentes principales de error son dos. La menor, del orden del 3 % son las variaciones de la temperatura y las incertidumbres de los ajustes de las curvas de incremento de ganancia con el voltaje para cada detector. Este efecto se puede ver en el histograma final, resultado del ajuste de ganancia (figura 3.10). Los errores dominantes, provienen, sin embargo de la multitud de problemas que pueden afectar a un cristal.

Como el ajuste se realiza mientras otras operaciones están en curso, el detector suele estar abierto, con las mitades a una distancia considerable, por tanto, se suelen

ajustar las mitades independientemente. Solo algunas noches hemos tenido la oportunidad de realizarlo para ambas mitades, y no se obtuvo un beneficio sustancial en cuanto al tiempo, debido al menor ángulo sólido.

Durante el ajuste de ganancia se han cambiado algunos cristales (en realidad, paquetes cristal/APD), así que han entrado nuevos cristales completamente desplazados en iteraciones donde casi todos convergían ya.

De la misma manera, se han encontrado muchos fallos y voltajes que situaban los picos completamente fuera de la región de adquisición (es decir, en Overflow o Underflow del ADC) y ha habido que recolocarlos a mano dentro de la región en la que los programas pueden calibrarlos, para después volver a realizar el ajuste.

3.5. Descripción de los programas de ajuste

El procedimiento de ajuste de ganancia esta formado por 3 programas (*scripts*), que se explican a continuación:

3.5.1. Programa de barrido

El programa de barrido está incorporado en cualquiera de las interfaces ya descritas de los programas de control de parámetros de CALIFA. Fundamentalmente, el algoritmo se encarga de cambiar los voltajes de todos los detectores y reiniciar la adquisición cada 40 minutos, durante un periodo de 8-10 horas. Este bucle sencillo se complica por dos razones:

- Actualmente, el sistema de adquisición no admite ningún control remoto, la única opción viable encontrada tras discutir el problema con el grupo de adquisición ha sido simular la pulsación de teclas en una de las interfaces interactivas de la adquisición (frente a la alternativa de rehacer los programas de adquisición que, posiblemente tenga lugar como ampliación futura).

Afortunadamente, la interfaz usada para la adquisición local, se ejecuta bajo `Tmux` [aut], un sistema de multiplexación de consolas de texto (aplicación similar a `screen` [Lau], aunque adicionalmente permite ejecutar varios procesos en una misma única ventana dividida en varias subventanas). Convenientemente, `tmux` permite la simulación de pulsación de teclas mediante comandos de la consola de comandos: es este sistema el que ha sido utilizado.

- Por otra parte, como ya se ha explicado en 2.4, el sistema de adquisición local de CALIFA, se encuentra en un ordenador diferente (1xir123) al de el responsable del control de parámetros (Landgw01), lo que hace necesaria algún tipo de comunicación entre estos dos ordenadores.

Para solucionar estos problemas, hubo que implementar de nuevo un servidor con el protocolo XMLRPC) (descrito ya en 2.6.2) al que poder enviar los comandos de inicio y parada de la adquisición. La función de este servidor es simplemente, tras recibir la orden desde el script de control en landgw01, mandar comandos al programa de adquisición (mediante la opción de simulación de pulsación de teclas que ofrece `tmux`) que convenientemente se encuentra en el mismo ordenador que el servidor. Un extracto muestra aquí. El programa completo puede ser examinado en [Per21].

```

1
2 [...]
3
4 DUMMY_MODE = False
5
6 def stopRun():
7     _stopRun("daq_land_x861-75")
8
9 def startRun(description):
10    _startRun("daq_land_x861-75", description)
11
12 def _stopRun(consoleName):
13     """
14     sends the appropriate keys to the
15     """
16     if DUMMY_MODE:
17         print "request for stopping run. DUMMY MODE"
18         return
19
20     keySequences = ['"3"', '"1"']
21
22     for keySeq in keySequences:
23         command = 'tmux send-keys -t %s %s' % (consoleName,
24         ↪ keySeq)
25         #print command
26         exitCode, out, err = bashCall(command)

```

```

26         time.sleep(0.5)
27     print exitCode
28
29 def _startRun(consoleName, description = "(no description)":
30     """
31     sends the appropriate keys to the acquisition to start a run
32     """
33     if DUMMY_MODE:
34         return
35         print "request for starting run. DUMMY MODE"
36
37
38     keySequences = ['"3"', '"1"', '"C-u"', '"%s"' % description ,
39                     ↪ '"C-m"']
40
41     for keySeq in keySequences:
42         command = 'tmux send-keys -t %s %s' % (consoleName,
43         ↪ keySeq)
44         #print command
45         exitCode, out, err = bashCall(command)
46         time.sleep(0.5)
47     print exitCode
48
49 def check():
50     """
51     a simple function to check that there is THIS proxy running
52     ↪ on the other side of the connection
53     """
54     return "proxy running"
55
56 def serve():
57     """
58     starts the remote control in serving mode, so the acquisition
59     ↪ can be controlled from other computers
60     """
61     server = SimpleXMLRPCServer(("0.0.0.0", 60004), logRequests=
62     ↪ True, allow_none = True)
63
64     try:
65         server.register_function(startRun, "startRun")
66         server.register_function(stopRun, "stopRun")

```

```

61         server.register_function(check, "check")
62         server.serve_forever()
63
64     except KeyboardInterrupt:
65         print "keyboard interrupt: exiting..."
66
67     [...]
```

Una vez que se puede controlar la adquisición remotamente, el programa para el barrido de ganancia es bastante sencillo.

En primer lugar, comprueba que el programa servidor de control de la adquisición está corriendo en el ordenador de adquisición (lxir123 y si la respuesta es afirmativa, entra en un bucle en el que cambia los valores de polarización de todos los APDs , reinicia la adquisición, espera el tiempo predeterminado y repite hasta barrer el rango completo. La parte del código que realiza este barrido es bastante sencilla, y un extracto se muestra a continuación: el código completo se puede encontrar en [Per21].

```

1  def _biasScan(self, initialShift, finalShift, stepSize, stepTime,
2              runMode = ACQ_MODE_DUMMY):
3      """
4      performs a bias scan
5      """
6
7      # 1) check for the proxy server up .
8
9      self.califa.log("bias scan")
10
11     if not self.califa.checkBsProxy(runMode): # proxy is
12         ↪ running
13         print ("acq controller server not found. Aborting...")
14         time.sleep(1)
15         return
16
17     validate(initialShift, lambda x: abs(x) < 20, ValueError,
18         ↪ "initialShift too large. Max = -20V")
19     validate(finalShift, lambda x:abs(x) < 20, ValueError, "
20         ↪ final shift too large. Max = 20V")
```

```

18     validate(stepSize, lambda x:abs(x)<5, ValueError, "step
    ↪ size too big. Max 5V per step.")
19
20     nSteps = (finalShift - initialShift) / stepSize
21     validate(nSteps, lambda x: x>0 , ValueError, "initial and
    ↪ final shifts don't match with step size")
22
23     # 1) save all the settings
24
25     for preamp in list(self.califa.preamps.values()):
26         preamp.biases2memo() # save biases in special memory
27
28     # 2) perform a previous global bias shift
29
30     currentShift = initialShift - stepSize
31     # an additional step is inserted. It will be undone
    ↪ before first iteration
32
33     print(colorize("* applying initial bias shift of {}V...".
    ↪ format(initialShift), "yellow"))
34
35     self.califa.globalShift(currentShift);
36     countdown(5, " waiting %is for bias to settle...")
37     print(" Done ")
38
39     # 3) loop through bias steps
40     i = 0;
41     try:
42         while 1:
43             i += 1
44
45             ### 1) shift
46             self.califa.globalShift(stepSize); currentShift +=
    ↪ stepSize
47             print(colorize("* step {} bias shifted {:.2f}V".
    ↪ format(i, currentShift), "yellow"))
48             countdown(5, " waiting %i secs for ramping to
    ↪ settle...")
49             x = self.califa.getXtal(HALF_WIXHAUSEN, 3, 4, 0)

```

```

50         print(" sample bias of xtal W3.4.0: {:.2f}".
               ↪ format(x.currentBias))
51     x = self.califa.getXtal(HALF_MESSEL, 3, 4, 0)
52     print(" sample bias of xtal M3.4.0: {:.2f}".
               ↪ format(x.currentBias))
53
54     ### 2) take data
55     timeStr = time.strftime("%H:%M:%S")
56     print(colorize(" starting run at {}... ".format(
               ↪ timeStr), "green"))
57     if runMode == ACQ_MODE_DUMMY:
58         print (colorize(" [DUMMY MODE]", "yellow"))
59
60     self.califa._startRun(runMode, " step {}":
               ↪ deltaBias:{:2.1f}".format(i, currentShift))
61
62     countdown(stepTime, " remaining time %i s ")
63     timeStr = time.strftime("%H:%M:%S")
64     stepStr = secs2human(stepTime)
65     print(colorize(" stopping run {} at {} (after {})
               ↪ ".format(i, timeStr, stepStr), "green"))
66     print();
67
68     self.califa._stopRun(runMode)
69     time.sleep(2)
70
71     # two conditions for break, depending on the
               ↪ direction of the scan
72
73     if (finalShift > initialShift):
74         if (currentShift >= finalShift):
75             break
76     else:
77         if (currentShift <= finalShift):
78             break
79
80     except KeyboardInterrupt as _:
81         print(colorize("User break...", "lightred"))
82
83     finally:

```

```

84         # 4) restore biases
85         print(colorize("* restoring original biases...", "
           ↪ yellow"))
86         for preamp in self.califa.preamps.values():
87             preamp.memo2biases()
88         print(" Done.")
89         _ = input("bias scan finished. press any key to return
           ↪ to main menu")

```

Una vez que el programa de barrido ha acabado, lo que lleva entre 4 y 12 horas (dependiendo del número de puntos y la estadística necesaria), la adquisición ha generado varios ficheros de datos, (uno por cada punto de polarización), que contienen cada uno los espectros (en List-mode) de cada uno de los detectores de CALIFA.

Estos datos, que están en formato `.lmd`, han de ser convertidos a otro formato para poder ser convenientemente analizados, en este caso, ROOT [col]. ROOT es un conjunto de librerías en C++, orientado al tratamiento y visualización de datos de experimentos basados en sucesos, estándar en física nuclear experimental y se utiliza en este trabajo para el tratamiento y la visualización de los datos adquiridos. Este paso se realiza de forma manual, usando un programa conversor de formatos (llamado Unpacker) proporcionado por el grupo de adquisición, y específico para el experimento .

Al acabar este paso, tenemos un conjunto de ficheros en formato ROOT ([col]) con espectros para cada detector y cada incremento/disminución de voltaje.

3.5.2. Obtención de los máximos para de cada punto del barrido

El segundo programa, también realizado en ROOT, se encarga de encontrar los máximos, y generar una tabla con los valores para cada cristal, junto con otras datos de interés: la bondad del ajuste (χ^2) al pico, el valor del centroide, y sus parámetros (área, FWHM).

El procedimiento para encontrar los picos es el siguiente:

En primer lugar se carga el histograma y se prueba a hacer un ajuste con la función `TSpectrum` de ROOT, calibrado para que devuelva un máximo de 10 picos.

⁰En detalle, el Unpacker utilizado es el de análisis en línea, realizado para el visualizador de espectros Go4 ([aut21]).

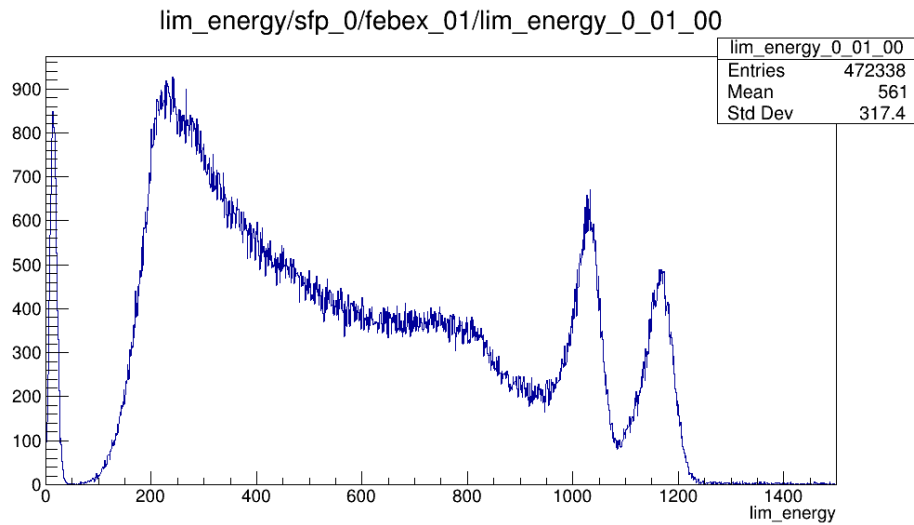


Figura 3.2: Espectro de la fuente de cobalto en un cristal (wixhalf, sfp2, fbx3).

```

1  for(int i = MINSFP; i < MAXSFP; i++) {
2      for(int j = MINFEBEX; j < MAXFEBEX; j++) {
3          nplots[i][j] = 0;
4
5          for(int k = MINCH; k < MAXCH; k++){
6              ch = k;
7              if (!Skip(i, j, ch)){
8                  h = LoadHist(i, j, ch); // loads the required
9                      ↪ histogram
10                     if (h == nullptr ) {
11                         cout << "!!!HIST NOT FOUND!!!" << endl;
12                         continue;
13                     }
14
15                     c->cd(k+1)->Clear();
16                     h->Draw("hist");
17                     h->GetXaxis()->SetRangeUser(900,3000);
18
19                     if (h->GetEntries() > MINENTRIES ) {
20                         // use TSpectrum class to search for peaks
21                         TSpectrum* spec = new TSpectrum(10); // maximum of
22                             ↪ 10 peaks
23                         TH1F* back = (TH1F*)spec->Background(h, SENSITIVITY)
24                             ↪ ;
25                         spec->Search(h, SENSITIVITY, "goff", THRESHOLD);

```



```

23         Double_t* ax = spec->GetPositionX();
24         Double_t* ay = spec->GetPositionY();
25         const int np = spec->GetNPeaks();
26         double sig_bgd_ratio[np];
27         int n60Co_peaks_identified = 0;
28         cout << "npeaks:" << np << endl;

```

A continuación busca, entre esos picos, 2 picos que cumplan la condición de ser los mas altos y de alturas similares, como se espera de la fuente de ^{60}Co .

```

1
2 for(int l = 0; l < np; l++) { // loop through all the peaks
    ↪ detected
3
4     // In the case that the 1173/1332 peaks do not have the highest
    ↪ peak-to-total ratios, search for nearby peaks; and
    ↪ remove
5
6     sig_bgd_ratio[l] = ay[l]/back->GetBinContent(back->FindBin(ax[l
    ↪ ])) -1.;
7     if(sig_bgd_ratio[l] > MIN_SB_RATIO)
8     {
9         bool neighboring_peak_found = 0; // for each peak
10
11        for (int m = 0; m < np; m++) // loop through all the others,
            ↪ trying to find a neighbour with the same height
12        {
13            if (l==m) continue;
14
15            // Cobalt peaks are identified as the two peaks with the
            ↪ same height
16            if (abs(ax[l]/ax[m]-1173./1332) < 0.02 || abs(ax[l]/ax[m
            ↪ ]-1332./1173) < 0.02){
17                neighboring_peak_found = 1;
18                n60Co_peaks_identified++;
19                break;
20            }
21        }

```

Finalmente arregla el orden, y procede a ajustar dos gaussianas sobre los picos. Los detalles y el código completo pueden encontrarse en [Per21]

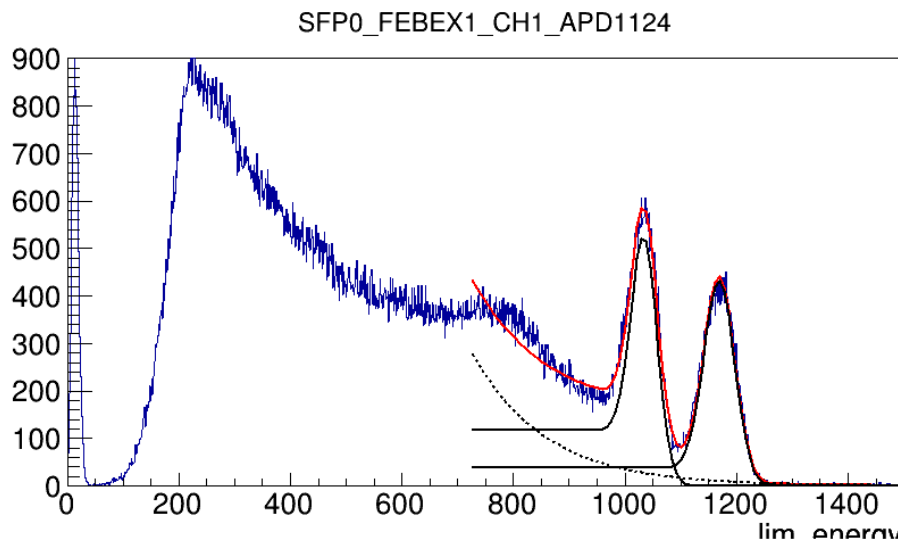


Figura 3.3: Ejemplo del ajuste a los dos picos para el espectro de la figura 3.2.

A Partir de aquí se genera una tabla que contiene los valores de los parámetros para cada canal en ese ΔV .

- SFP: bloque de adquisición (0-3).
- FEBEX: índice de la tarjeta de adquisición (de 16 canales).
- CH: canal electrónico dentro de la tarjeta.
- APD: número de serie del APD.
- chi2: bondad del ajuste para el pico de 1173 keV.
- mu1173 : centroide del pico de 1173 keV.
- d: error en la determinación del centroide.
- mu1332: centroide del pico de 1332 keV.
- d: error en la determinación del centroide.
- FWHM1173: anchura del pico a 1173 keV.
- d: error en la anchura del pico.
- FWHM1332: anchura del pico a 1332 keV.

- d: error en la anchura del pico.
- ptb1173: cociente pico/fondo para el pico a 1173 keV.
- ptb1332: cociente pico/fondo para el pico 1132 keV.

En el apéndice A.1 , se puede encontrar un ejemplo de una de las tablas de salida, en concreto para la iteración 12 con $\Delta V = 0$ (sin variar el voltaje óptimo).

3.5.3. Obtención de las curvas de ganancia

Una vez se dispone de una tabla para cada incremento de voltaje, se ajustan los datos a una curva $canal(V)$, para luego poder saber que incremento de voltaje generará el desplazamiento necesario del pico para llevarlo a la posición estipulada.

Como la fuente de ^{60}Co genera 2 picos, se obtienen dos curvas. Cada una se ha ajustado con una función cuadrática $ch(v) = A + B * v + C * v^2$. Esta función ha demostrado mejores resultados frente a la inicialmente planteada. Inicialmente, proveniente de la manera en la que se ajustaba la ganancia en el banco de pruebas, se intentaba ajustar a una exponencial, puesto que la teoría indica esa variación con la ganancia [Hama]. Sin embargo, el ajuste exponencial fallaba completamente cuando había situaciones con ruido, o picos muy desplazados de la región nominal. Como el objetivo era llevar a la región deseada el mayor número de canales de manera automática, decidí cambiar a un ajuste sencillo que fuera mas flexible en situaciones límite.

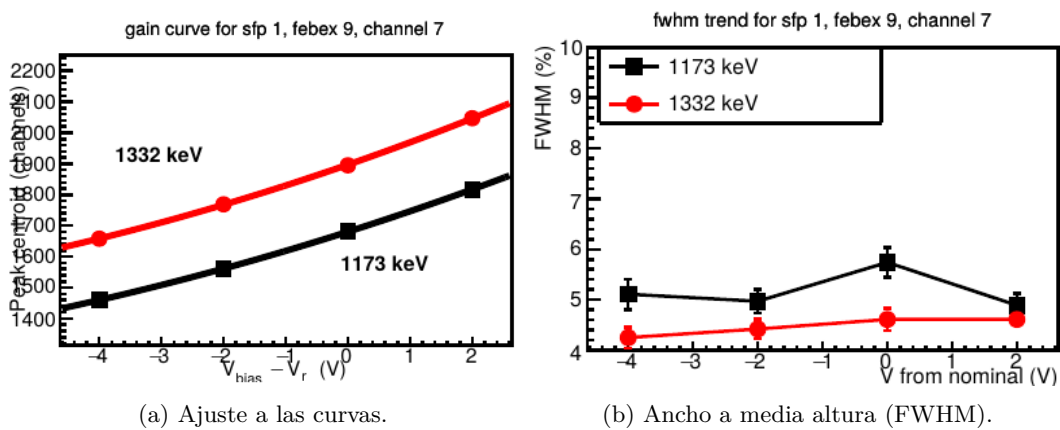


Figura 3.4: Ejemplo de ajuste para un canal normal.

Mediante estas tablas y con este programa es donde se detectan los cristales con problemas, y viendo estas dos curvas se puede decidir si es un problema únicamente

de voltaje mal asignado, lo que puede apuntar a un error en el emparejamiento APD-cristal, o un error en la conexión.

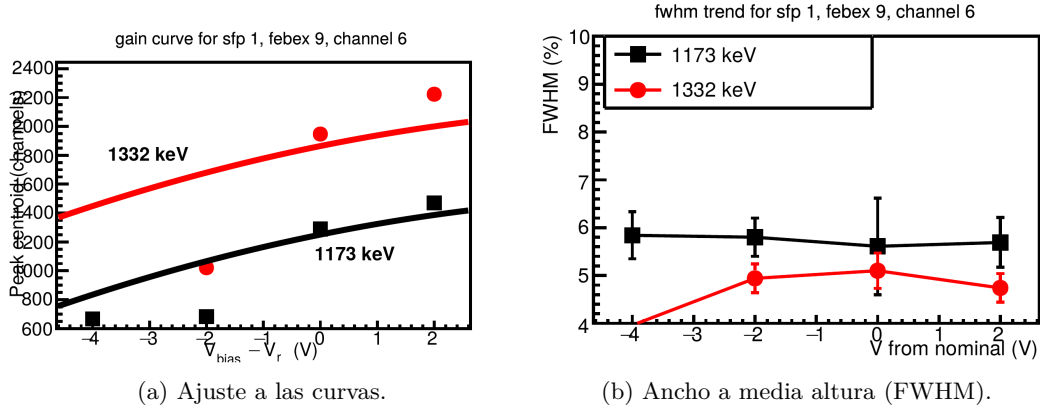


Figura 3.5: Ejemplo de ajuste para un canal con la ganancia errónea, pero funcionando correctamente. (Al disminuir el voltaje, se pierde la señal del primer pico y con ella, el ajuste).

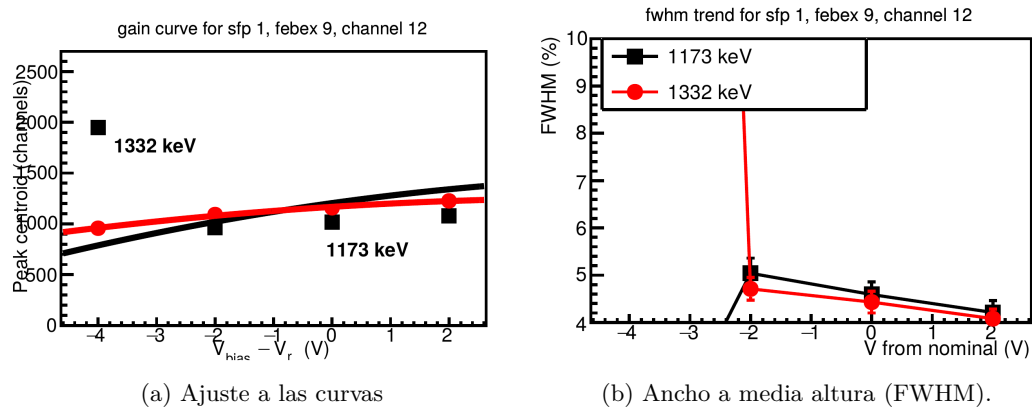


Figura 3.6: Ejemplo de ajuste para un canal con problemas en la electrónica. El canal del centroide de los picos no varía con la variación de polarización.

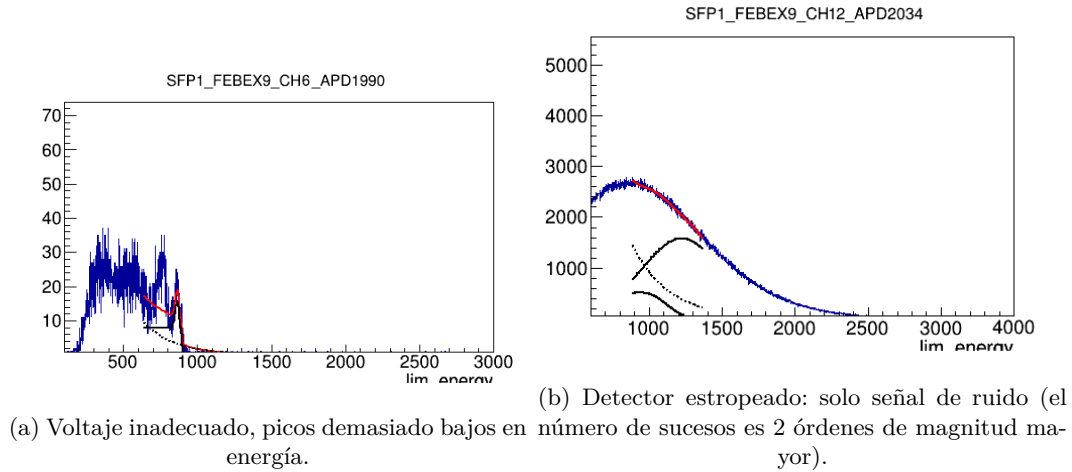


Figura 3.7: Espectros para los casos de las figuras 3.5 y 3.6.

3.5.4. Ajuste de las ganancias según los parámetros extraídos

Una vez se dispone de las curvas para cada cristal, solo queda generar el incremento de voltaje necesario para cada cristal, de forma que las curvas se desplacen todas al punto estipulado.

El procedimiento básico delineado mas arriba es, en realidad, un poco mas complejo, puesto que el programa debe coger como entrada una tabla de voltajes, y modificar únicamente aquellos para los cuales hay datos de calidad suficiente. Como se ha explicado arriba, esto es una consecuencia del trabajo en paralelo con el montaje del detector y la solución de problemas en cristales individuales

El programa final también deshace la correspondencia entre canales de adquisición y de control (ver 2.4.1)

3.6. Ajuste de ganancia de CALIFA, S454, campaña de Febrero de 2021

En la campaña de 2021 se partía de la situación del experimento s454 (1.7.2), con los valores del ajuste de ganancia manual realizado en el año 2018. De este ultimo experimento se obtuvieron los valores correctos para un 60 % de los cristales actuales de una mitad de CALIFA. Para el resto, hubo que realizar el ajuste a mano, debido a errores en los programas de ajuste. Este ajuste, por tanto, no era satisfactorio porque la dispersión era mucho mayor de lo deseable para algunos cristales. La situación inicial en Febrero de 2021, se puede visualizar en la siguiente figura.

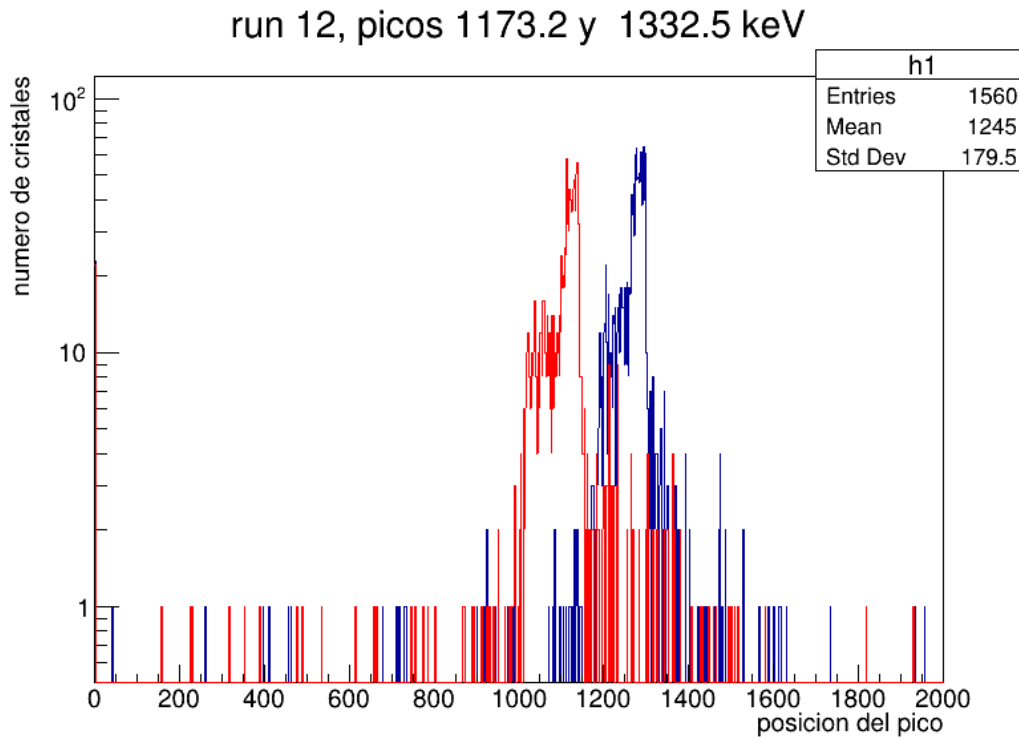


Figura 3.8: Situación de partida en la campaña de 2021. Histograma de la posición inicial de los picos de la fuente de cobalto (1173.2 keV en rojo, 1332.5 keV en azul. Ver texto.

Tras realizar el primer barrido de voltajes, observamos lo siguiente. La figura 3.8 muestra el histograma de la posición de los dos picos de la fuente de cobalto (1173 en rojo, 1332 en azul) para los cristales para la medida sin modificación del voltaje de polarización ($\Delta V = 0$).

En esta distribución, se observa una desviación típica de 179.5, que será utilizada como figura de mérito para evaluar el ajuste de ganancia. Se ha escogido la desviación típica como muestra de la dispersión en vez del ancho a media altura (FWHM), porque al no tener una forma gaussiana, la anchura a media altura no refleja bien la calidad del ajuste de ganancia por dos razones:

- La presencia de cristales ya calibrados tiene el efecto de superponer un pico estrecho sobre una base muy ancha, en esencia superponiendo dos distribuciones diferentes, lo que invalida los requisitos para poder modelarlo a una gaussiana, es decir, la contribución de muchas fuentes de error, en promedio no sesgadas.
- En general, no estamos interesados tanto en la anchura del histograma, si no en evitar que haya cristales fuera de la distribución.

Como se puede ver, el ajuste de ganancia en el experimento anterior, se ajustó para dejar aproximadamente 1keV por canal, de forma que los picos aparecen en el canal correspondiente a su energía en keV. Con esto se esperaba aprovechar todo el rango dinámico de los ADCs y facilitar el análisis en línea (que se visualiza sin calibrar). Sin embargo, durante el análisis posterior, algunos detalles de los espectros quedaron muy cerca del máximo de los ADCs, por lo que para esta campaña se decidió un factor mas conservador, llevando el pico de 1170keV al canal 1000, (incluso perdiendo, la correspondencia 1keV/canal).

Se realizaron varias iteraciones del mismo algoritmo, primero con la mitad 1 (Wixhausen), iteraciones 6-10, mientras se depuraban los programas y finalmente iteraciones con las 2 mitades presentes. En la siguiente figura se pueden ver algunos de ellos. Las razones para tener que realizar muchas pasadas ya han sido explicadas mas arriba: solo se podía calibrar una mitad a la vez y durante el proceso, se intercambiaban cristales defectuosos durante las iteraciones y se estaba probando con diferente numero de puntos en la curva de ganancia para así minimizar el tiempo de medida (finalmente se determinó que eran suficientes 4 puntos para obtener buenos ajustes)

Para la prueba #12, punto de partida para este ajuste, se decidió usar solo 5 puntos, y con algo menos de estadística. El argumento detrás de esta simplificación es, por una parte, que los buenos valores de ajuste indicaban que se podía continuar con menos puntos y, por otra parte no menos importante, el hecho de que la situación fuera cambiante, con varios cristales siendo cambiados y depurando los errores, hacia necesaria de todas formas muchas repeticiones del ajuste de ganancia, por lo que podríamos beneficiarnos de tiempos menores para cada uno ¹.

Demostrando, que no se perdía resolución, ni se perjudicaba el ajuste de la curva voltaje-ganancia por encima de valores aceptables, todas las iteraciones posteriores se realizan con 5 puntos, y un tiempo de medida de 20 minutos, frente a los 50 iniciales. Para las ultimas iteraciones, además, donde ya estaban los cristales prácticamente calibrados, el rango de incremento de voltaje se redujo a 4V (de -2 a +2 V), con objeto de ajustar mejor la curva a la zona de interés. Estos cambios reflejan el hecho de que en la campaña de 2021, ya no se intentaba encontrar la curva teórica como en 2019, donde se ajustaba a una exponencial, si no, reconociendo la gran influencia de otros errores en el ajuste, y la necesidad impuesta de proceder iterativamente, encontrar una ajuste sencillo a la porción de la curva que nos interesaba, para llevar los valores a la convergencia en varios pasos.

¹Además, las pruebas con 9 puntos necesitan mucho tiempo y no pueden ser llevadas a cabo durante el día cuando puede haber gente trabajando en la zona del blanco.

Prueba	fecha	puntos	max 1335	STDev	errores	comentarios
#8	22/2	9	—	—	>200	Solo una mitad
#12	23/2	5	1245	179.5	>200	Situación de partida
#13	23/2	5	1304	117.4	62	
#14	25/2	5	1319	83.75	43	
#15	27/2	5	1093	56.5	16	Cambio de calibración
#16	1/3	5	1094	13.83	16	

Cuadro 3.1: Evolución de la distribución de ganancias en los detectores durante el ajuste de ganancia (Explicación en el texto).

En la tabla, se observa la progresión del ajuste de ganancia. La columna errores señala el número de cristales que quedaron fuera de la calibración. Es interesante señalar que para la iteración #15, se decidió cambiar drásticamente la calibración. Un cambio importante de voltaje, habiendo restringido las rampas de calibración a (-4, -2, 0, +2, +4), afecta al ajuste de ganancia: en la tabla se puede ver como la desviación típica disminuye, pero en las gráficas se aprecia que las curvas de dispersión de los picos de la fuente son apreciablemente mas anchas en la base. Se decidió realizar una última iteración sin tratar de depurar ya ningún cristal, lo que mejoró algo la dispersión de ganancias, pero sin llegar a los niveles de la prueba #14, por ejemplo. Nótese que la desviación estándar se ve fuertemente afectada por el número de cristales totalmente fuera de calibración y por eso experimenta un descenso continuo.

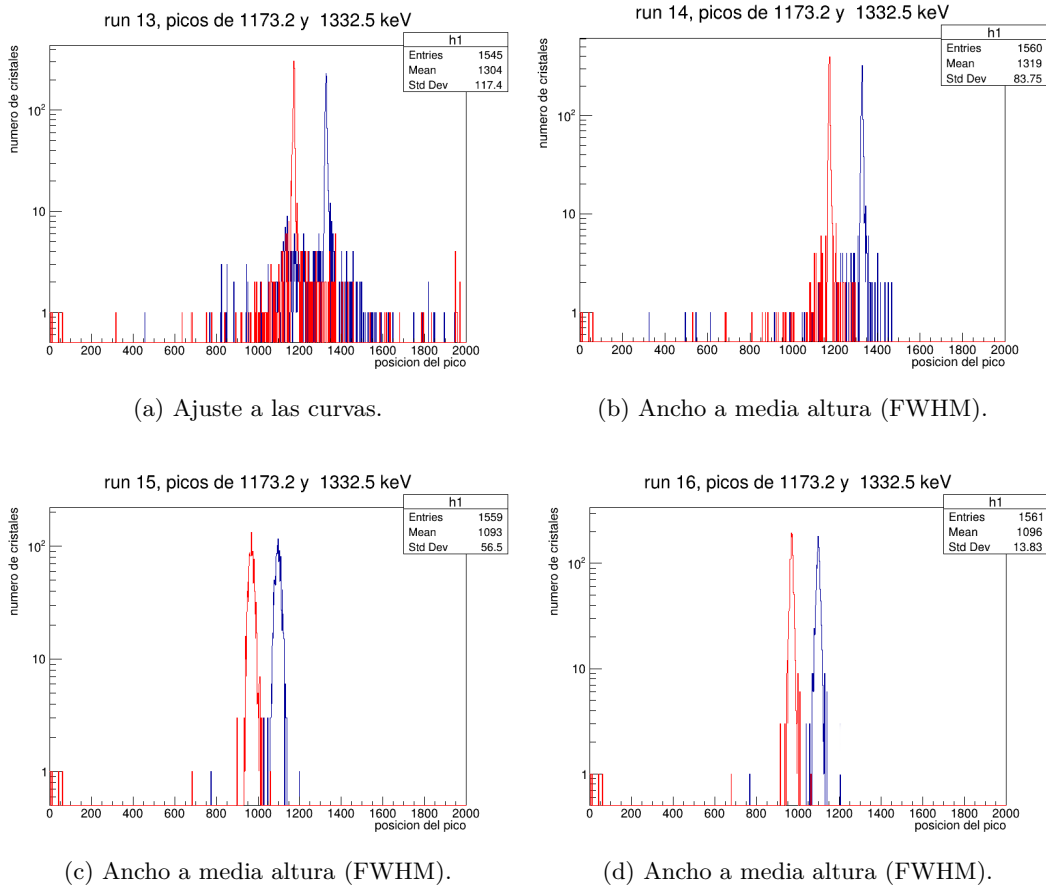


Figura 3.9: Ejemplo de ajuste para un canal con la ganancia errónea, pero funcionando correctamente.

Para la prueba 16, aparte de algunos cristales aislados que quedaban por solucionar, se observa que la distribución es suficientemente buena (ya no es mejor que la de la prueba anterior. En ese momento, y estando a 20 horas del tiempo de haz se decidió dar por bueno el ajuste actual y tomarlo como valor por defecto para CALIFA.

3.7. Resultados finales

A continuación, se muestra de nuevo la distribución de los pico de 1173 y 1335 keV, para la fuente de cobalto, tras finalizar la prueba 16. La desviación estándar es 13.83 para el pico de 1335 keV, lo que representa un FWHM de 32 canales, y un FWHM/centroide de 3.2 %. Esto puede parecer imposible en un primer momento, puesto que está por debajo de la resolución de los cristales (en torno al 6 %). Sin embargo, no olvidemos que lo que estamos representando en este gráfico, es el

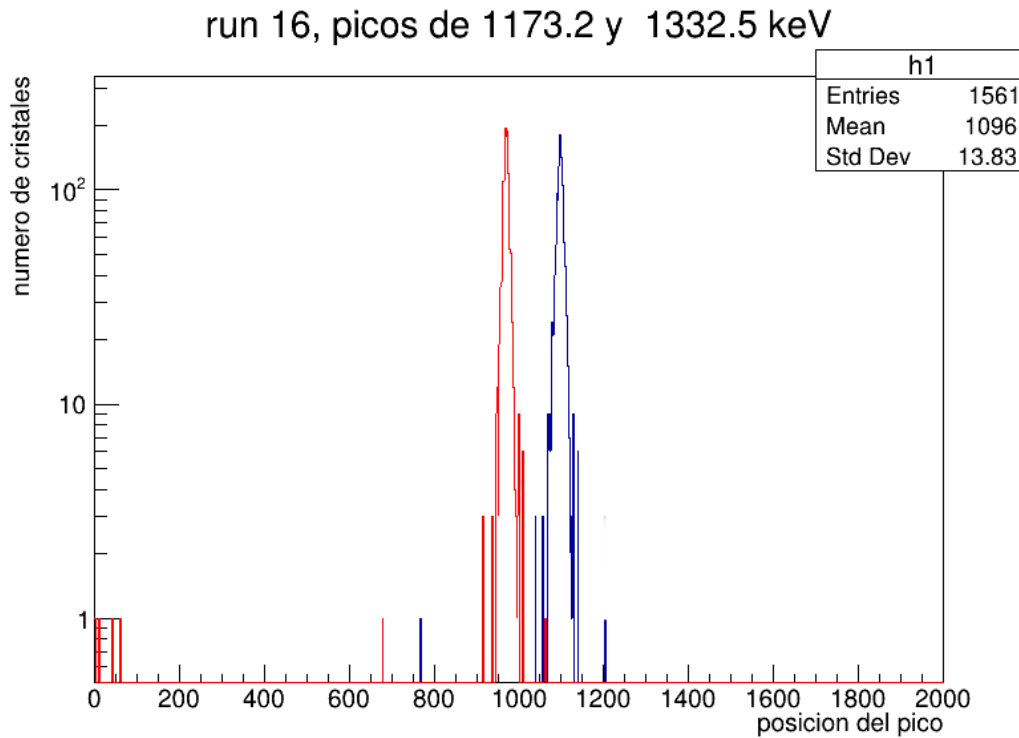


Figura 3.10: Situación final antes del experimento S545 en la campaña de 2021. Histograma de la posición inicial de los picos de la fuente de cobalto (1173.2 en rojo, 1332.5 en azul (ver texto)).

histograma de la posición del máximo de un pico del espectro de la fuente en cada centellador, sin importar su resolución en energía.

Puesto que el FWHM de los picos del espectros en cada uno de los centelleadores se interpreta como la medida del error en la posición de ese pico, cualquier valor en el histograma del ajuste de ganancia por debajo de el 6 % no tiene valor de mérito, puesto que el error en los puntos iniciales es del orden del 6 %. Dicho de otra forma, este histograma debería convolucionarse con una gaussiana que represente ese error del 6 %. Ya que el objetivo de este ajuste era proporcionar una calibración suficientemente buena para el experimento, se tomó, por tanto como criterio de aceptación, que el FWHM/centroide fuera menor de ese 6 %, situación que se cumple en la iteración #16 y que por tanto finaliza el proceso el ajuste de ganancia.

Una vez cargada la configuración en CALIFA, se tomó como base para el experimento S494. Estos valores servirán de punto de partida para mejorar en los siguientes experimentos y campañas experimentales.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

4.1. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido el desarrollo del sistema de control necesario para poder operar CALIFA en sus primeros experimentos de 2018 a 2021, en su situación actual, adecuando al mismo tiempo su estructura a las necesidades organizativas deseadas para FAIR. A lo largo de estos años, la estructura de CALIFA fue evolucionando y con ello y con la experiencia adquirida, lo hizo igualmente el sistema de control.

A este respecto, el mayor logro de este trabajo es, sin duda, el haber podido llevar a cabo los de 6 experimentos realizados (S454, s473, s444, s467, s494, s515, s455) hasta la fecha, sin problemas en el control de CALIFA y con una precalibración adecuada para poder realizar el análisis en línea.

A día de hoy se dispone de una plataforma segura y estable de control de parámetros para CALIFA y durante la pandemia hemos podido monitorizar y controlar el detector y la adquisición remotamente desde Madrid y Munich.

En detalle, los hitos de este trabajo ha sido:

- Disposición de la estructura hardware de control.
- Programación de los controladores de bajo nivel para los preamplificadores.
- Programación de la lógica de control, incluyendo la lectura fuera de pulso. (*offspill*) debido a la existencia de ruido provocado por los preamplificadores, y la generación de un sistema controlado de modificación de voltaje (rampas).
- Implementación de las distintas interfaces de usuario.
- Implementación de un lenguaje de control.
- Depuración de todos los errores en los detectores de CALIFA, usando estas herramientas.
- Programación de los algoritmos para el ajuste de ganancia.
- Procedimiento de ajuste de ganancia, previo a los experimentos.

En retrospectiva y como es habitual, escribir los programas finales de control ha supuesto una parte pequeña del esfuerzo: la organización y todas la modificaciones que he tenido que realizar en respuesta a los fallos y desviaciones sobre los planes previstos inicialmente, han supuesto la gran parte del tiempo y esfuerzo en este proyecto.

Durante mis estancias en GSI (2020 y 2021), y Lund (2018), he realizado además, otros trabajos paralelamente, que se han solapado en el tiempo y temática con este trabajo, complementando mi implicación con CALIFA:

- Participación en el ensamblaje de los centelleadores y emparejamiento con APDs (Lund, 2018).
- Realización de pruebas de linealidad de cristales en banco de pruebas (Lund 2018).
- Participación en desmontaje y montaje de las mitades de CALIFA, incorporando los nuevos cristales adquiridos durante las campañas (GSI 2020-2021).
- Diseño de otras aplicaciones paralelas a las del control de CALIFA, como control de las fuentes de alimentación generales y sistema de aviso por mensajes ante anomalías. (GSI 2020)
- Diseño y fabricación del soporte del blanco de R3B (GSI 2020-2021).
- Diseño de soportes y colocación de los detectores de fibra (GSI 2021).

4.2. Trabajo Futuro

Como ya se ha indicado, mi responsabilidad dentro de R3B es el control de CALIFA. Para ello he desarrollado un sistema de control que ha permitido CALIFA y llevarlo al punto de operación correcto en cada experimento. Por esta razón, ante los problemas que encontramos con los controladores de interfaz EPICS, decidimos retrasar el esfuerzo de estandarización frente a la obtención de resultados.

No obstante, el siguiente paso lógico es una reimplementación de los controladores directos (los IOCs según la nomenclatura EPICS) para adherirse al estándar de FAIR. Afortunadamente, debido al diseño de la estructura de control, sólo es necesario reemplazarlos por las nuevas versiones, sin tener que modificar otras partes del sistema. Ya he comenzado con este desarrollo y se prevé que este listo para el primer cuatrimestre de 2022.

Respecto a CALIFA, el detector esta aún en una fase de desarrollo y pruebas. Actualmente cuenta con 1560 de los 1952 cristales previstos, y se espera completarlo durante los próximos años. la finalización de la parte restante del *barrel*, no supone ningún cambio con respecto al control (o adquisición): basta con sustituir los controladores nulos (*dummies*) por otros reales. En cuanto al hardware, será necesario un cableado extra y rellenar los alveolos restantes con nuevos cristales. Esta tarea, sin embargo, conlleva desmontar CALIFA de su soporte actual, colocar los detectores en una sala limpia, y volver a montar el detector en la grúa-soporte. Una vez montado, se realizará de nuevo el ajuste de ganancia para todo el detector, esta vez incluyendo los nuevos cristales.

Para la zona frontal con detectores CEPA y los detectores IPhos restantes, el proceso será similar (probablemente en otra campaña diferente) pero ligeramente mas complicado respecto al control: En esta parte, los preamplificadores y las fuentes de voltaje no están integrados en un mismo módulo: debido a los altos voltajes de operación (1000-2000V), la electrónica de las fuentes es mas voluminosa y ha de ser colocada aparte. Con toda probabilidad, habrá otros módulos diferentes, para los que habrá que proporcionar nuevas interfaces de control.

En un futuro mas lejano, dentro del control de parámetros quedan aún algunos parámetros sin controlar. Algunos, como los umbrales y otros parámetros de adquisición dependientes de cada cristal, tienen un control parcial con interfaces propias: en el futuro deberán unificarse con esta, proporcionando una interfaz de usuario común a todos ellos, pero no esta decidido que forma tomará.

En otros casos, el hardware no está disponible aún, por lo que no se espera progreso en el próximo año:

- Control del flujo de nitrógeno: El flujo y la temperatura del nitrógeno deben de ser monitorizados. No existe todavía el dispositivo.
- Control de las fuentes de alimentación: Actualmente, he programado un monitor que avisa antes anomalías (que ocurren durante la optimización del haz, antes de un experimento), pero no está integrado con el resto de controles.
- Apertura y cierre automatizados de CALIFA: Por seguridad y por su uso tan limitado, esta planeado dejarlo fuera del control remoto, pudiendo ser operado solo desde dentro de la sala experimental.

Cualquiera de estas mejoras es preparada en Madrid, para ser implementada durante la preparación de los experimentos: las campañas experimentales continúan, y cada año se irán incorporando nuevas funcionalidades.

Bibliografía

- [1] Peter Van Roy y Seif Haridi, eds. *Concepts, Techniques, and Models of Computer Programming*. The MIT Press; 2004.
- [2] Amit Patel. *Yapps, yet another python-python parser system*. Available at <http://theory.stanford.edu/~amitp/yapps/>. Abr. de 2005.
- [3] Bernard Gastineau y col. «Design Status of the R3B-GLAD Magnet: Large Acceptance Superconducting Dipole With Active Shielding, Graded Coils, Large Forces and Indirect Cooling by Thermosiphon». En: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 18.2 (2008), págs. 407-410. DOI: 10.1109/TASC.2008.922529.
- [4] et al M. Bendel R. Gernhäuser. «iPhos, a new technique for the CALIFA CsI(Tl) calorimeter.» En: *J. Phys.: 587 012049 (2015)* (2015).
- [5] M.Borri et al. «Detector production for the R3B Si-tracker». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* (2016).
- [6] R3B Collaboration. «R3B - 2018 COMMISSIONING». En: *General Program Advisory Committee (G-PAC) September 2017* (2017).
- [7] R3B Collaboration. «R3B - 2018 COMMISSIONING». En: *General Program Advisory Committee (G-PAC) September 2017* (2017).
- [8] René Reinfahrt Kathrin Göbel Michael Heil. «Coulomb dissociation of ^{16}O into ^{12}C and ^4He ». En: *Call for Experiment Proposals for beam time in 2021/2022 Submission to the General Program Advisory Committee (G-PAC)* (2020).
- [9] varios autores. *GO4, an online analysis framework*. 2021. URL: https://www.gsi.de/en/work/research/experiment_electronics/data_processing/data_analysis/the_go4_home_page.
- [10] Angel Perea. *Califa ctl*. Abr. de 2021.
- [11] varios autores. *Terminal multiplexer*. URL: <https://github.com/tmux/tmux/wiki>. (accessed: 01.09.2016).
- [12] Cern collaboration. *An open-source data analysis framework used by high energy physics and others*. URL: <https://root.cern.ch>. (accessed: 01.09.2021).