

TESIS CARRERA DE MAESTRIA EN CIENCIAS FÍSICAS

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MONITOR DE
RADIACIÓN PARA APLICACIONES ESPACIALES**

Diego Hernán Salazár Alarcón
Maestrando

Dr. Esteban Alejandro Sánchez
Director

Miembros del Jurado

Dr. O. Grizzi (Instituto Balseiro)
Dr. H. Pastoriza (Instituto Balseiro)
Ing. P. Orellano (Invap)

2 Diciembre de 2013
División de Colisiones Atómicas y Física de Superficies
Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

Agradezco a Dios, a mis padres, hermano y familiares por su apoyo incondicional (A mi sobrino don Atha por "ser tan hincha" cuando había que estudiar.....jeje).

A la Argentina, San Carlos de Bariloche y al Instituto Balseiro por acogerme, formarme y mostrarme una nueva cara de la ciencia, la tecnología y la ingeniería.

A la división de Colisiones Atómicas y a mi director Esteban por permitirme ingresar a un proyecto tan bonito, plagado de retos nuevos y de toda índole. (Nunca se me va a olvidar el y..... llegando a considerarlo como un padre adoptivo en Bariloche).

A Esteban Sánchez, Guillermo Zampieri, Oscar Grizzi, Julio E. Gayone, Javier Dawidowski, Juan Longhino, Nacho Márquez, Roberto Mayer, Aureliano Tartaglione, Jerónimo Blostein, Luis, Javier Santisteban, Enzo Sauro, Juan Eduardo Bergallo, Francisco Lallana, Gerardo Quintana (UBA), Esteban Boggio, María del Carmen y Monica Segura, por su paciencia y enseñanzas.

A Ezequiel que me desconcentraba con el "hombre cueva" cuando me sentía cansado.

A Rene por su amistad incondicional y a todos mis amigos en general.....

" Si juzgas a un pez por su habilidad para trepar un árbol, vivirá toda su vida pensando que es un inútil ".

Albert Einstein.

Índice de contenidos

Índice de contenidos.....	v
Resumen.....	vii
Abstract.....	ix
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Propuesta del proyecto MARE (Monitor Argentino de Radiación Espacial)	5
1.2 Antecedentes de instrumentos similares.....	8
1.2.1 ICARE e ICARE-NG.....	8
1.2.2 CEASE.....	9
1.2.3 HEP.....	11
1.2.4 REM	12
2 MONITOR ARGENTINO DE RADIACIÓN ESPACIAL (MARE).....	14
2.1 Detectores	14
2.1.1 Pérdida de energía de iones en la materia	16
2.1.2 Blindajes y filtros de entrada.....	18
2.1.3 Detector de barrera de superficie (SBD)	20
2.1.4 Detector LEEP (Low Energy Electron Proton)	21
2.1.5 Detector PT (Particle Telescope).....	25
2.1.6 Detector HEP (High Energy Proton)	28
2.2 CADENA ANALOGICA DE DETECCIÓN (Analog Board)	31
2.2.1 Pre amplificación	31
2.2.2 Amplificación.....	33
2.2.3 Máximo Contaje y Restauración de línea de base	34
2.3 ELECTRONICA DIGITAL PARA EL INSTRUMENTO MARE (Digital Board)	38

2.3.1	Etapa de muestreo y detección de altura de pulso	39
2.3.2	Comunicación con la computadora de acta (OBC).....	40
2.3.3	Asignación de bines para los detectores por restricciones de telemetría	42
2.3.4	Modelo de desarrollo de placa digital para el instrumento MARE	46
2.4	Ciclos térmicos del MARE.....	48
3	IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA	50
3.1	Armado y caracterización del prototipo de la placa analógica de vuelo	50
3.2	Caracterización de la respuesta lineal de la cadena analógica, y del multicanal ORTEC 926.....	54
3.3	Apilamiento (Pile - up).....	56
3.3.1	Respuesta en frecuencia de la cadena A203+A206 (Sin BLR).....	57
3.3.2	Respuesta en frecuencia de la cadena A225F+A275FC+BLR1.....	62
3.4	Pruebas térmicas de la electrónica analógica.....	66
4	CARACTERIZACIÓN DE LOS DETECTORES	72
4.1	Mediciones con fuentes radiactivas emisoras de β^-	72
4.1.1	Mediciones con detector tipo A de 2000 μm	73
4.1.2	Mediciones con detector ULTRA de 500 μm	86
4.2	Pruebas con el filtro magnético del prototipo del detector PT.....	92
4.3	Pruebas térmicas de los detectores.....	96
4.3.1	Detector ultra de 100 μm de espesor.....	97
4.3.2	Detector tipo AA de 2000 μm	100
4.3.3	Detector tipo AB de 150 μm de espesor.....	102
5	CARACTERIZACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DIGITAL	105
6	CONCLUSIONES	112
7	Agradecimientos	115
8	Bibliografia	115

RESUMEN

El Monitor Argentino de Radiación Espacial (MARE) tiene como objetivo medir partículas cargadas (electrones, protones y alfas) cubriendo el amplio espectro de flujos y de energías en condiciones de baja y alta actividad solar; con la posibilidad de seguir midiendo durante las erupciones solares. El mismo está formado principalmente por tres componentes: i) los detectores de radiación, ii) la electrónica analógica de conformación y amplificación de los pulsos generados en los detectores al arribar una partícula, y iii) la electrónica digital que analiza los pulsos, discrimina qué tipo de partícula interactuó con el detector, y los traduce en un espectro de energía que transmite a la computadora de a bordo.

En esta tesis se trabajó sobre la implementación y los ensayos del monitor, en cada uno de sus componentes:

En relación con la electrónica analógica se implementó el diseño propuesto para la placa de vuelo y se la montó en una caja de pruebas. Luego de modificar ciertas componentes para reducir el ruido en la electrónica, se verificó que la conformación de pulsos sea la correcta, y que la respuesta de toda la cadena de amplificación fuera lineal. También se estudió el efecto de apilamiento de pulsos para alta frecuencia de conteo. Se pudo determinar que para el conteo nominal máximo del MARE (50 kHz), la contribución al apilamiento de dos pulsos es menor al 6% y el de tres picos es prácticamente despreciable, que el porcentaje de pérdidas de eventos puede llegar hasta el 10%, y que el corrimiento en energía es tan solo de 4 keV. Las pruebas de ciclado térmico entre 25 a 68 °C, mostraron una disminución lineal en la ganancia total de la cadena analógica con una variación del 3% para 68 °C.

Respecto de los ensayos en los detectores, los mismos se hicieron midiendo con la electrónica analógica de vuelo los espectros de energías provenientes de fuentes radioactivas emisoras de alfas y betas, que se los comparó con

espectros calculados. Se estudiaron los efectos de las láminas delgadas de entrada viendo que el espectro de electrones no se afecta para las energías estudiadas (0,14 - 2,3 MeV), y que para partículas alfas la perdida de energía está de acuerdo con el previsto para esas láminas. Se comprobó que el filtro magnético desarrollado para el detector telescopico elimina todo el espectro de electrones con energías de al menos 2,3 MeV, y deja pasar partículas alfas de 5 MeV. Por otro lado, se estudió el efecto de la dispersión múltiple en electrones energéticos observándose que los espectros medidos detectan energías mayores a las esperadas si se consideran solo trayectorias lineales. Este efecto es tanto mayor cuanto más grueso es el detector. Por último, se estudió cómo la temperatura incrementa el ruido y reduce la resolución en energía, mostrando que la performance de los detectores propuestos es adecuada para temperaturas menores a los 40 °C; y si se requiere trabajar a mayores temperaturas, los implantados son más adecuados que los de barrera de superficie.

Finalmente, para la electrónica digital se comprobó que el estado actual del prototipo del proyecto solo permitía realizar contajes de pulsos reales para frecuencias menores a 1 kHz, para frecuencias mayores la pérdida de conteo era muy grande. Las últimas modificaciones realizadas (12 de Diciembre) por la empresa Emtech S.A. en los programas de la FPGA y en el *software* de adquisición, mostraron que el proyecto MARE no pierde cuentas para frecuencias en el rango de operación previsto (0 - 50000 Hz), funcionando como multicanal en el Modo Calibración, y elaborando el histograma del espectro en 9 bins para pulsos de entrada provenientes de fuentes reales.

Palabras clave: DETECTORES, RADIACIÓN ESPACIAL, SATÉLITES.

ABSTRACT

The Argentine Space Radiation Monitor (MARE) was designed to measure charged particles (electrons, protons and alphas) covering the wide range of integrated fluxes and energies at low and high solar activity, with the possibility of performing measurements during solar flares. MARE has three main components: i) the radiation detectors, ii) the analog electronic that shapes and amplifies the pulses generated by the detectors when they are hit by an incoming charged particle, and iii) the digital electronic that analyzes the pulses, discriminates types of particles, and builds an energy spectrum that is transmitted to the onboard computer.

This thesis is about the implementation and testing of the monitor, in each of its components:

The analog board designed for flight was implemented and mounted on a test box. After modifying certain components to minimize noise in the electronics, it was verified that the pulse shaping was correct, and the entire amplification chain had a linear response. The effect of pulse pile-up for high counting frequencies was also studied. It was determined that for the maximum nominal count of MARE (50 kHz), a) the contribution of two pulses pile-up is less than 6% and negligible for three pulses, b) the percentage of loss events can reach up to 10%, and c) the energy shift is only 4 keV. Thermal cycling tests between 25 - 68 °C showed a linear decrease in the overall gain of the analog chain with a variation of 3% at 68 °C.

The tests in the detectors were performed by using the analog flight electronics, and by comparing the measured alpha and beta energy spectra (emitted from radioactive sources) with the calculated ones. The addition of very thin foils to the entrance of the detectors showed that the input energy spectrum is not affected for incoming electrons with energies between 0.14 to 2.3 MeV, and for alpha particles their energy loss agrees with that calculated for these foils. The measurements performed with the magnetic filter developed for the PT detector showed that it precludes electrons (with energies of at

least 2.3 MeV) to hit the detector, and allows the passage of 5 MeV alpha particles. On the other hand, experiments performed with energetic electrons showed that the effect of multiple scattering caused the detection of electrons at energies higher than those expected for linear trajectories. This effect increases with the thickness of the detector. Finally, we studied how the rise of the temperature increases the noise and reduces the energy resolution, showing that the performance of the proposed detectors is suitable for temperatures below 40 °C. If higher operation temperatures are required, the implanted detectors are more suitable than the surface barrier ones.

The tests performed to the digital electronics showed that the software developed for the actual prototype board only allowed counting of real pulses for frequencies below 1 kHz. For higher frequencies the loss of detected events increased significantly. The last modifications (December 12) performed by Emtech S.A. in the FPGA and acquisition softwares showed that the MARE project does not lose counts for frequencies in the required operating range (0 - 50000 Hz), functioning as a multichannel analyzer in the calibration mode, and developing the spectrum histogram in 9 bins for pulses coming from real sources.

Keywords: DETECTORS, SPACE RADIATION, SATELITES.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

Los principales riesgos para una misión satelital son el lanzamiento y su ubicación en órbita. Superadas estas etapas, los satélites deben sobrevivir durante su vida útil a las inclemencias del llamado *ambiente espacial*, el cual está compuesto por partículas cargadas, partículas neutras y fotones de distinto origen, con un amplio rango de energías.

En el caso de partículas cargadas, como electrones, protones y partículas alfa, éstas pueden provenir del sol, del espacio exterior, o de las regiones del entorno a la tierra atrapadas por el campo magnético terrestre. Esta última región se conoce como *cinturón de radiación de Van Allen* [1] (Figura 1.1), en el cual se identifican dos zonas bien definidas en función de la altitud. El denominado cinturón interno, que se extiende desde 0.1 hasta 1.5 radios medios terrestres [2] está compuesto principalmente por protones (H^+) altamente energéticos que superan los cientos de MeV y por electrones (e^-) con energías de cientos de keV. El cinturón externo, que se extiende desde 2 hasta 10 radios medios terrestres, relevante para órbitas geoestacionarias (en el cual el satélite gira sobre el ecuador con la misma velocidad angular terrestre a una altura aproximada de 36000 km [3]), está compuesto principalmente por electrones y en menor proporción por iones (H^+ , He^{++} , O^+) de alta energía.

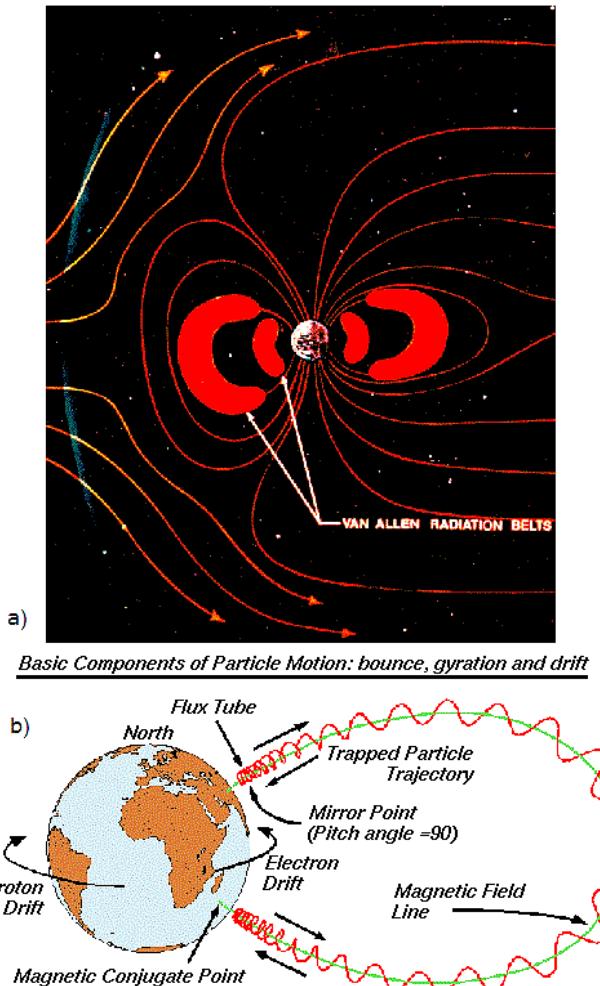


Figura 1.1 - a) Cinturones exterior e interior de Van Allen [2]. b) Trayectoria de una partícula cargada (e^-) atrapada en un cinturón de Van Allen [2].

Los flujos de partículas en los cinturones de Van Allen pueden variar drásticamente debido a tormentas geomagnéticas, que pueden durar desde algunas horas hasta más de 20 horas [4], y a cambios constantes en la actividad solar. Respecto de esta última, la tierra es constantemente alcanzada por partículas del viento solar, que es el flujo intenso de iones livianos y electrones de muy baja energía (plasma) que son eyectados desde la corona solar viajando con velocidades del orden de 400 km/s. [5] La corona solar es la región más externa de la atmósfera solar, constituida por gases a altas temperaturas, del orden de 2 millones de grados centígrados, con una densidad diez billones de veces mayor a la densidad terrestre a nivel del mar, y que se extiende desde unos 16.000 km sobre la Fotosfera (la superficie visible del sol) hasta unos cuantos millones de kilómetros más, es decir, que se extiende en dirección radial y origina el flujo de partículas llamado viento

solar, el cual inunda el espacio interplanetario y llega hasta el planeta tierra [6].

También ocurren erupciones solares periódicas con eyeción de protones, partículas alfa, iones pesados y electrones de alta energía. Estas erupciones son también conocidas como fulguraciones o *flares* solares [7], los cuales tienen una corta duración, desde pocos segundos hasta algunas horas, con un número de partículas eyectadas muchos órdenes de magnitud mayor respecto de lo que se mide en condiciones de baja actividad.

En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de cómo cambió el espectro de radiaciones durante el mes de octubre-noviembre del 2003 en función del tiempo, medido por los satélites GOES-11 y 12 [8]. Se muestra la potencia recibida en el espectro de rayos X, los flujos para protones (P) integrados en distintos rangos de energía, el cambio porcentual de neutrones, y las variaciones del campo magnético para una situación de altas fulguraciones solares [9].

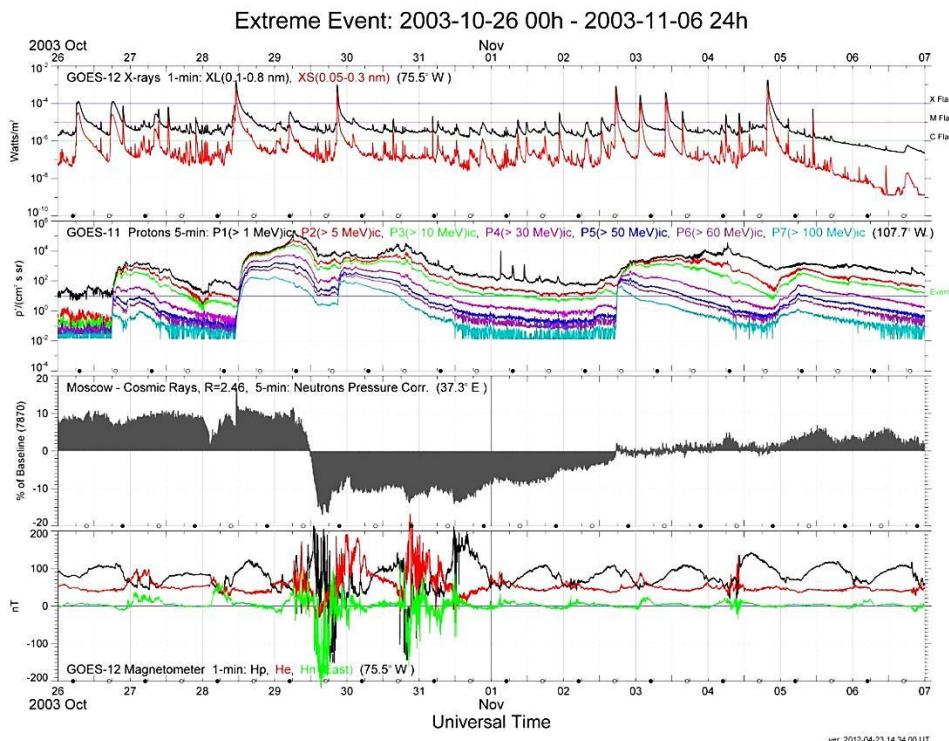


Figura 1.2 - Ambiente espacial en función del tiempo entre los meses de octubre-noviembre de 2003: En el panel superior se muestra la potencia recibida en el espectro de rayos X con longitudes de onda 0,1 - 0,8 nm (XL) y 0,05-0,3 nm (XS). En el segundo panel están los flujos integrados para protones con energías superiores a 1 MeV (P1), 5 MeV (P2), 10 MeV (P3), 30 MeV (P4), 50 MeV (P5), 60 MeV (P6), y 100 MeV (P7). En el tercer panel se muestra el cambio porcentual de neutrones, y en el panel inferior, las variaciones del campo magnético. [8]

En la Figura 1.3 se muestra la contribución de las distintas partículas cargadas al ambiente espacial en órbitas geoestacionarias expresadas en términos de sus flujos integrados en función de sus energías [10]. Los puntos corresponden a datos experimentales en períodos de alta y baja actividad solar provistos por satélites GOES [8] en los años indicados en la Figura, y la línea de trazos a los valores promedios estimados para una misión de 15 años de duración. En dicha Figura se observa que la variación de los flujos máximos y mínimos puede ser entre tres y cinco órdenes de magnitud, debido a los llamados *flares* o erupciones solares. Lo importante a analizar de este espectro de radiaciones es que entre 0 y 2 MeV se miden mayoritariamente electrones, mientras que desde 2 MeV en adelante existen mayoritariamente protones. Por otro lado el flujo desde bajas energías varía desde 10^8 partículas/(cm².s.sr) hasta 10^{-2} partículas/(cm².s.sr) para 100 MeV, es decir, diez órdenes de magnitud.

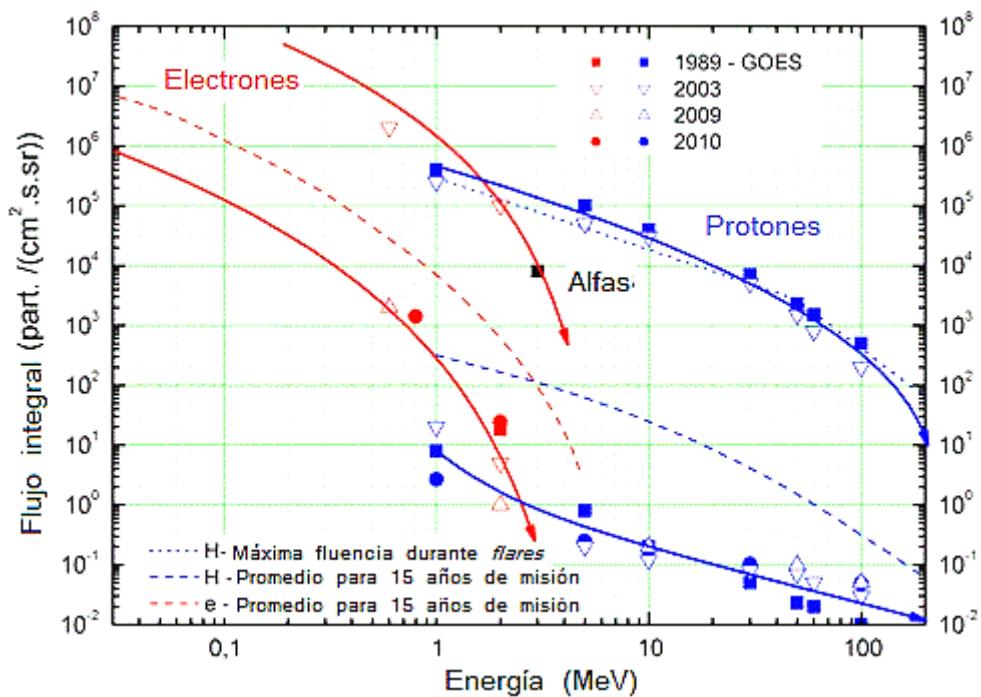


Figura 1.3 - Composición del ambiente espacial: Flujo integral de partículas en función de la energía, para electrones y protones [10]. Los puntos son valores experimentales promedio de máximos y mínimos de actividad solar, provistos por satélites GOES entre los años 1989 y 2010. Las líneas de trazo son el promedio del flujo integrado para electrones y protones para 15 años de misión. La línea punteada azul corresponde a la emisión de protones durante los cinco minutos de máxima actividad solar en 1989 [11],[12], y el punto negro es el correspondiente a la emisión de partículas alfa en esas condiciones. Las líneas gruesas son graficadas como una guía para la vista.

Otra componente del ambiente de radiación espacial son los rayos cósmicos, que en principio incluyen todos los elementos de la tabla periódica (alrededor del 89% son protones, 10% helio y 1% de núcleos más pesados). Éstos tienen energías que van desde los 100 MeV (Por ejemplo protones con velocidades del 43% de la velocidad de la luz, hasta protones de 10 GeV, es decir un 99.6% de la velocidad de la luz), pero con flujos muy bajos.

Las dosis de radiación acumuladas (energía depositada por unidad de masa) producidas por las distintas fuente de radiación en los diferentes componentes del satélite, puede causar daño, lo que reduce el tiempo de vida útil de satélite. En los satélites de telecomunicaciones se diseñan los blindajes y se eligen las componentes y su distribución en el satélite, teniendo en cuenta no solo su resistencia mecánica para soportar el lanzamiento o las variaciones térmicas que sufren durante la órbita, sino que es también muy importante considerar la dosis total acumulada en su vida útil (típicamente 15 años), para que la tasa de fallas por efecto de la radiación sea mínima. Por estas consideraciones, agencias internacionales como la NOAA [13] (National Oceanographic and Atmospheric Agency) administran satélites (GOES [8]) especialmente diseñados para medir la radiación espacial e informar sobre sus variaciones, particularmente cuando éstas pudieran incrementarse hasta valores muy grandes que puedan generar un daño importante en los satélites en órbita, o incluso a nivel terrestre. Estas señales de advertencias pueden ser usadas por algunos sistemas para apagar temporalmente los mismos buscando mitigar el daño. Existe también la posibilidad de que los propios satélites lleven además instalados como parte de su instrumental, monitores de radiación que les provean señales de alarma en caso de que la dosis por radiación exceda ciertos valores considerados como seguros.

1.1 PROPUESTA DEL PROYECTO MARE (MONITOR ARGENTINO DE RADIACIÓN ESPACIAL)

En el año 2006, el gobierno Argentino crea la Empresa Argentina de Soluciones Satelitales AR-SAT [14], cuya misión principal es operar con fines comerciales las posiciones orbitales geoestacionarias de 72 y 81° Oeste (Figura

1.4), contando además con los derechos sobre la ingeniería y el desarrollo de tres satélites de manufactura nacional. Al año siguiente AR-SAT firma un contrato con la empresa argentina INVAP S.E. [15] para el desarrollo y fabricación de dos de estos satélites de comunicaciones, el ARSAT-1 y 2 [16], a ser lanzados inicialmente en los años 2012 y 2013.



Figura 1.4 - Posiciones orbitales de satélites geoestacionarios ARSAT 1, 2 y 3. [16]

Según el diseño del primero de estos satélites, el ARSAT-1 cuenta con una sola antena de retransmisión, sin embargo la empresa ARSAT decide explorar la posibilidad de ocupar el lugar de esa antena faltante con carga útil en lugar de lastre para compensar el centro de gravedad. En el año 2008 ARSAT invitó a grupos de investigación de la Universidad Nacional de Cuyo con sede en Bariloche (Instituto Balseiro) y a instituciones nacionales (INVAP, CNEA) y extranjeras (Thales Alenia Space) a proponer experimentos para ser embarcados junto al satélite ARSAT-1. Luego de numerosas reuniones para definir qué tipos de experimentos, y bajo qué condiciones se podría embarcar en el ARSAT-1, en el año 2009 grupos del Centro Atómico Bariloche obtuvieron financiación de la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica mediante el PID 0008-2008 (Proyecto de Investigación y Desarrollo) para el desarrollo de tres experimentos que pudieran embarcar en el ARSAT-1. Estos

consistieron en el desarrollo de prototipos para un Monitor de Radiación Espacial, de un Detector de Fluorescencia Terrestre, y la calificación y el estudio de daño por radiación en Paneles Solares para órbitas Geo.

En el año 2010 se define finalmente el conjunto de instrumentos a embarcar en ARSAT-1 en una plataforma anexa al satélite denominada ACTA, por el acrónimo de Arreglo de Cargas Tecnológicas Argentinas; y en diciembre de ese año se realiza un encuentro (CDR: Critical Design Review) donde se presentan los distintos instrumentos junto con toda la documentación probatoria de las factibilidades de embarcar en el proyecto ACTA.

Esta tesis de Maestría trata sobre la implementación y ensayo del monitor de radiaciones denominado MARE (Monitor Argentino de Radiación Espacial). La finalidad de dicho monitor es la medición de partículas cargadas (electrones, protones y alfas) cubriendo el amplio espectro de fluencias y de energías presentados en la Figura 1.3, en condiciones de baja y alta actividad solar; incluyendo la posibilidad de seguir midiendo durante las erupciones solares.

En la Figura 1.5 se muestra un esquema del satélite ARSAT-1 con el ACTA integrado en una de sus caras, y una vista del MARE, en el cual se destacan tres detectores de partículas cargadas (Particle Telescope *PT*, High Energy Proton *HEP* y Low Energy Electron and Proton *LEEP*).

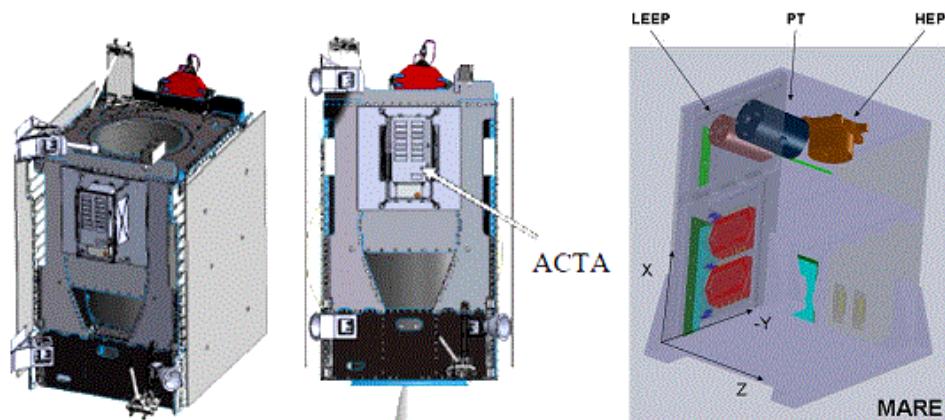


Figura 1.5 - Modelo del satélite ARSAT-1, con el ACTA, que incluye el MARE [10-11].

1.2 ANTECEDENTES DE INSTRUMENTOS SIMILARES

Antes de pasar a describir los detalles del MARE, presentamos en esta sección algunos de los detectores diseñados para medir parte del ambiente espacial, en los cuales se inspiró el proyecto.

1.2.1 ICARE e ICARE-NG

ICARE [17] (Influence of Space Radiation on Advance Components) es un instrumento desarrollado por la agencia espacial francesa, para medir radiación ionizante (electrones con energías entre 100 keV y 3 MeV, protones con energías entre 5 y 45 MeV, y alfas con energías de 65 MeV y mayores a 100 MeV). ICARE vuela en el satélite SAC-C (Figura 1.6) desde noviembre del año 2000 con éxito total, fue probado en las estaciones espaciales MIR e ISS, es relativamente pequeño en tamaño ($11,6 \times 20,2 \times 9$) cm³, pesa 2,0 kg, tiene bajo consumo de potencia (2,5 W nominales o 2,8 W de pico, usando fuentes de polarización entre 20 y 50 volts), usa un protocolo de comunicación serial RS-422, puede ser encendido y apagado en cualquier momento, y su costo es de aproximadamente 615 k€. Su objetivo es proveer información en tiempo real sobre cambios de flujo en el ambiente espacial en función de la energía de las partículas detectadas (espectro de radiación) con una precisión razonablemente buena. Esto permite estudiar efectos de la radiación incidente en la electrónica del satélite, y dar señales de alarma en tiempo real cuando se excede un nivel máximo tolerado de radiación.

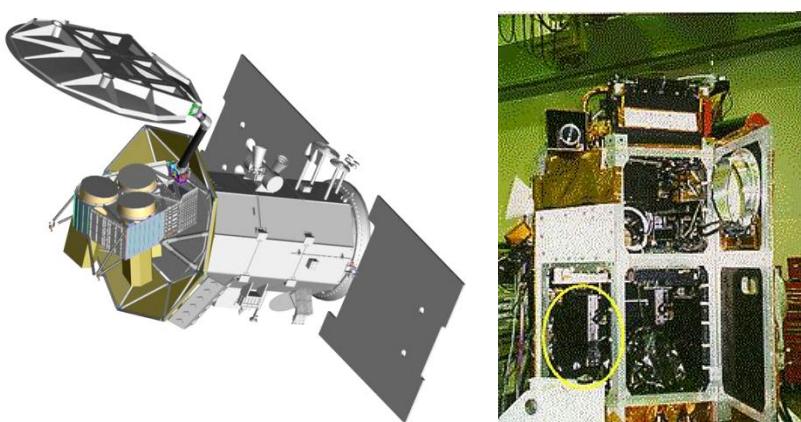


Figura 1.6 - Satélite SAC-D (Panel izquierdo), y monitor de radiación ionizante ICARE [17] a bordo de SAC-C (Panel derecho) [18].

ICARE-NG [19] es una nueva versión del instrumento ICARE, y su objetivo es estudiar los efectos de la radiación espacial en componentes electrónicos avanzados. Está compuesto por detectores de silicio de estado sólido, ubicados en un módulo llamado SPECTRE, el cual usa tres canales independientes para medir flujo de partículas (Electrones, protones y iones más pesados) y por un módulo con varios experimentos (MEX) en el cual se estudian efectos de la radiación en varios dispositivos electrónicos probados en tierra y se evalúa la dosis de radiación depositada en tarjetas electrónicas que incluyen dosímetros. Utiliza una interfaz o protocolo de comunicación serial RS-422 para su comunicación con la plataforma del satélite. El ICARE-NG está operando en las misiones CARMEN (ChARacterization et Modeling of the Environment) 1 y 2 propuestas por el CNES (Centre National D'Études Spatiales), embarcado en los satélites SAC-D [20] de la agencia espacial argentina CONAE, lanzado en mayo de 2010, y el satélite JASON-2 [19] lanzado en junio de 2008.

ICARE-NG detecta electrones con energías desde 250 keV hasta 4 MeV, protones con energías desde 8 hasta 100 MeV, iones pesados con energías de hasta poco más de 100 MeV, y flujos mayores a 1000 partículas/(s.cm²), con un conteo de hasta $\sim 3 \times 10^5$ partículas/s. Tiene un tamaño de (20x13,8x9,6) cm³, una masa de 2,4 kg, un consumo de potencia de 6 W y una tasa de envío de datos de ~ 420 bits/s [19] (Ver Figura 1.7).



Figura 1.7 - Satélite Jason-2, instrumento ICARE-NG, e ICARE-NG en satélite Jason-2 [18]

1.2.2 CEASE

CEASE [21] (Compact Environmental Anomaly Sensor) es un instrumento de vuelo desarrollado por la empresa AMPTEK Inc. y la fuerza aérea

norteamericana. La administración del programa espacial norteamericano tiene la responsabilidad de prevenir la degradación de los sistemas espaciales y corregir sus posibles fallas, usando herramientas que ayuden a entender sus causas, aislando fallas debidas a daño por radiación, de fallas debidas a diseño electrónico de éstos sistemas. Su objetivo principal es monitorear el ambiente espacial *in situ*, esencialmente protones con energías entre 0,77 y 47 MeV, y electrones con energías desde 0,05 MeV, o mediante el sensor SEE (Very large deposition energy events sensor), el cual detecta eventos causados por protones o iones pesados altamente energéticos (~ 100 MeV), que inducen interacciones nucleares en su paso por el detector.

CEASE da alarma en tiempo real debida a daño en los sistemas de vuelo (dispositivos electrónicos) producido por la radiación incidente. Posee un tamaño de (10x10x8,2 cm³), consume poca potencia (1,5 W), y tiene una masa de 1,0 kg, además se comunica con la computadora principal de la nave una vez por minuto con interfaz serie RS-422, enviando paquetes de datos de 10 bytes. También tiene la opción de enviar información detallada sobre el ambiente espacial por telemetría cada 5 segundos, usando un paquete de datos de 56 bytes, o enviar un archivo histórico del ambiente espacial cada 72 horas usando un paquete de datos de 52 bytes acumulado en *bins* de 15 minutos cada uno. CEASE voló en las misiones del departamento nacional de defensa norteamericano, TSX-5 y STRV-1C, con lanzamiento en la segunda mitad del año 2000, y dentro del programa de apoyo a la defensa (DSP: Defense Support Program) en Agosto del año 2001 [21-22] (Ver Figura 1.8).

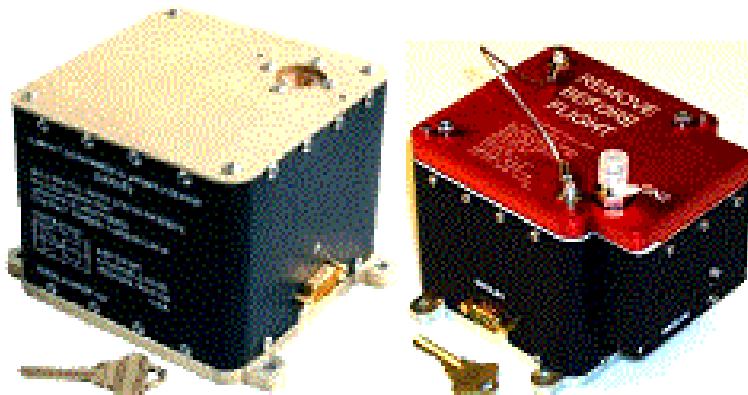


Figura 1.8 - Instrumentos de vuelo CEASE I, CEASE II. [21-22]

1.2.3 HEP

HEP (High Energy Proton Sensor), es un detector elaborado por la empresa norteamericana AMPTEK Inc. que funciona en modo telescopio (es decir con combinación de varios detectores de partículas) y mide el flujo integral de protones en el espacio de alta energía, con valores desde 25 MeV hasta poco más de 440 MeV. Combina nuevos materiales para detección de radiación, una geometría innovadora del sensor, y una combinación de blindajes activos y pasivos, para obtener mayor precisión en la medición de flujo de protones con energías mayores a 100 MeV en el cinturón interno de Van Allen, estos protones son altamente penetrantes, y ocasionan daño a la electrónica del satélite. Este proyecto surge debido a que existen muy pocos estudios sobre protones altamente energéticos en el cinturón interno de Van Allen, lo que requiere cambios en el diseño del instrumento, ya que se medirán flujos altos, usando detectores con baja apertura angular, y que inciden de forma omnidireccional. Debido a ésta situación, el flujo de protones presente en esta región del espacio es poco entendido y no se dispone de datos a esos valores de energía, por lo cual se usa en general para las simulaciones un modelo estándar de extrapolación para estudio de protones con energías mayores a 100 MeV (Estándar NASA Proton Model). [21]

HEP es un instrumento compacto que usa una combinación de detectores semiconductores delgados, con detectores centelladores gruesos elaborados con Gd_2SiO_5 , blindajes para reducir la respuesta del instrumento a alto flujo omnidireccional de protones, con un sistema flexible de procesamiento de datos, que permite obtener medidas precisas (considerando la existencia de dispersión nuclear inelástica de protones), y una apertura angular total de 12º. Está dividido en dos cajas, una de ellas incluye los detectores y tiene un tamaño de $(10 \times 10 \times 7)$ cm³, y la otra que incluye la electrónica tiene un tamaño de $(10 \times 10 \times 8)$ cm³. Es suficientemente liviano para vuelo (2,3kg), considerando que debe tener detectores con espesor suficiente para frenar protones altamente energéticos, lo que aumenta el peso y el volumen en el instrumento, un consumo de potencia total de 2,5 W, una tasa de envío de datos del orden de ~ 100 Bytes/s, y una capacidad de conteo máximo entre 2×10^3 s⁻¹ y $1,4 \times 10^5$ s⁻¹ [23-24].

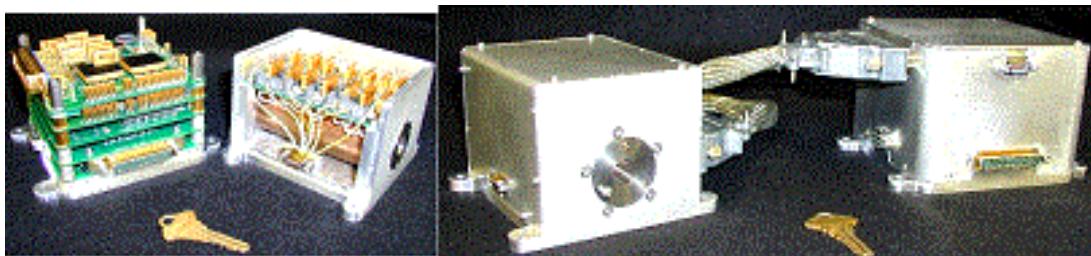


Figura 1.9 - Instrumento HEP desarrollado por la empresa AMPTEK, Inc. [23]

1.2.4 REM

REM (Radiation Environment Monitor) es un instrumento diseñado para medir flujo de protones con energías mayores a 30 MeV y flujo de electrones con energías mayores a 1 MeV. Está compuesto por dos detectores de estado sólido que miden la energía depositada por la radiación ionizante al detector. Cada uno de ellos tiene área y blindaje diferente, para ubicarse en rangos diferentes de medición de flujo y energía, además ambos detectores están cubiertos por un domo esférico de aluminio y el detector de protones tiene un blindaje adicional de tantalio, para frenar electrones con un rango de energías entre 1-10 MeV.

El pulso de carga producido por el paso de radiación ionizante a través de los detectores (Diodos de silicio) se mide usando pre-amplificadores sensibles a carga y conversores de señal analógica a digital (ADC) de 12 bits, además para reducir la cantidad de datos a la salida de los ADC, ésta es comprimida en histogramas de 16 bins.

REM está compuesto por dos módulos, uno que incluye los detectores y tiene dimensiones de $13 \times 10 \times 8 \text{ cm}^3$ con una masa de 1 kg, y otro que incluye la electrónica analógica, los ADC's, la interfaz para telemetría del instrumento con la computadora central del satélite, y el suministro de tensión para polarización de sus componentes, el cual mide $20 \times 16 \times 8 \text{ cm}^3$, y tiene una masa de 1,8 kg. El consumo máximo total de potencia es menor a 5 W. [25] (Ver Figura 1.10)

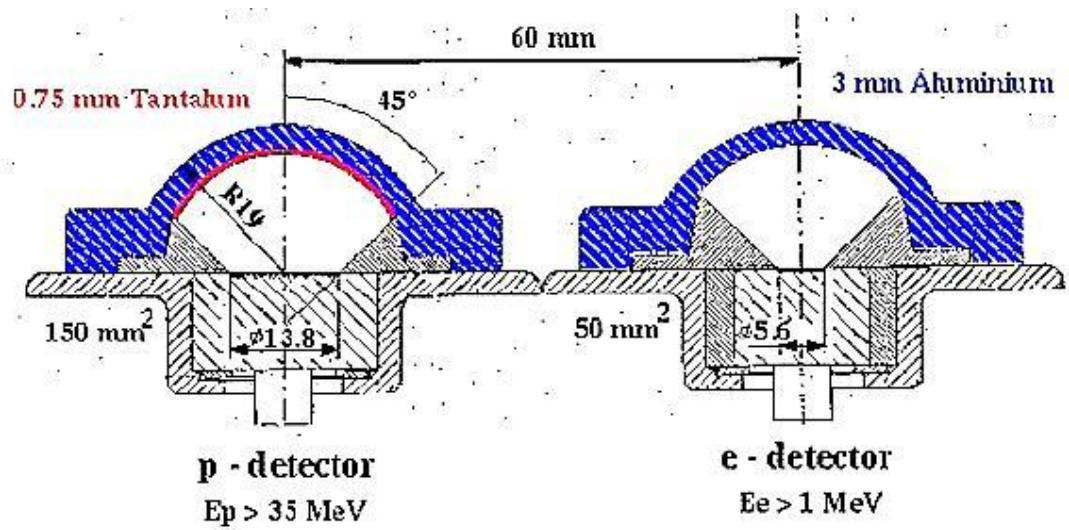


Figura 1.10 - Instrumento REM. [25]

CAPÍTULO 2

2 MONITOR ARGENTINO DE RADIACIÓN ESPACIAL (MARE)

El desarrollo del monitor de radiación espacial tuvo en cuenta el desarrollo de i) los detectores de radiación, ii) de la electrónica analógica asociada a ellos, iii) de la electrónica digital que elabora el espectro en altura de pulsos con la señal proveniente de los detectores y la comunicación con la computadora del ACTA; como así también iv) del diseño mecánico de su estructura y v) del análisis térmico de sus componentes. Los detalles de las factibilidades y el análisis de los primeros prototipos se presentaron en el Critical Design Review (CDR), para lo cual se presentó oportunamente (Diciembre 2010) la documentación correspondiente [10-26-27-28-29-30-31-32-33-34-35-36]. En ésta tesis se trabajó en la implementación de la electrónica analógica de vuelo, el prototipo de la electrónica digital, y la caracterización de los prototipos de detectores midiendo espectros de partículas provenientes principalmente de fuentes radioactivas.

En los próximos capítulos se presentan los puntos más relevantes de cada elemento del MARE (Cap.2), y los resultados obtenidos en la caracterización del mismo (Cap.3).

2.1 DETECTORES

Teniendo en cuenta la propuesta de medir el ambiente espacial en la órbita geoestacionaria de los satélites de comunicaciones de la serie ARSAT, el espectro de energía de las partículas cargadas presentado en la Figura 1.3 en condiciones de alta y baja actividad solar implica la necesidad de un monitor que cubra diez órdenes de magnitud del flujo de partículas, con energías entre 0 y 100 MeV. Esto es prácticamente imposible con un único detector, por lo que se propone utilizar tres detectores incluidos dentro del instrumento MARE: i) LEEP (Low Energy Electron & Proton) que cubrirá el rango de energías de 40 keV a 5 MeV, para un flujo de partículas formado principalmente por electrones, ii) PT (Particle Telescope) que medirá protones con energías

superiores a los 400 keV, y iii) HEP (High Energy Proton) que medirá protones con energías superiores a 40 MeV (Ver Figura 2.1).

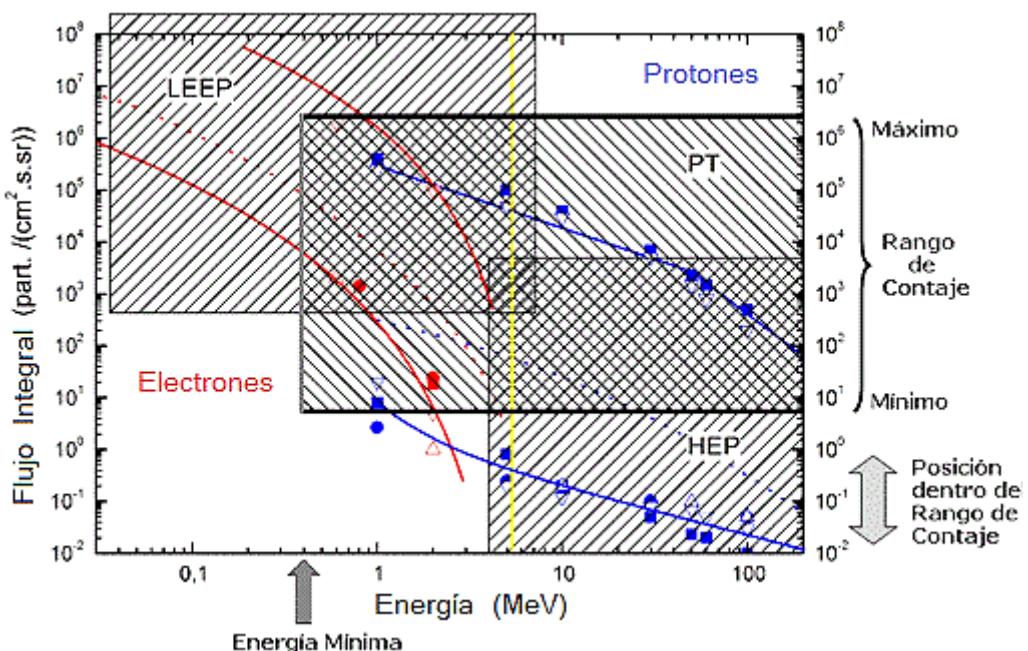


Figura 2.1 - Ambiente espacial cubierto por los tres detectores propuestos para MARE [37]

Los detectores poseen tres componentes principales: a) el soporte y blindaje para altas energías, b) los filtros de entrada y c) los dispositivos sensibles a la radiación formados por detectores de barrera de superficie (SBD). Los primeros tienen como objetivo dar la estructura mecánica del detector, proveer el blindaje necesario para evitar que partículas de altas energías lleguen a los dispositivos sensibles a la radiación y definir la apertura angular del detector; los segundos tienen como objetivo eliminar la luz incidente y alguna clase de partícula no deseada en el detector particular; y los terceros tienen como finalidad detectar las partículas que inciden por la apertura del detector, midiendo la energía depositada en los SBD. La elección de cada componente define el tipo de partícula que se pretende medir, los rangos de energía y los rangos de flujo.

En las secciones siguientes se presentan los conceptos necesarios para la definición de los parámetros característicos de cada uno de los detectores.

2.1.1 PÉRDIDA DE ENERGÍA DE IONES EN LA MATERIA

El principal fenómeno físico asociado al diseño de los detectores tiene que ver con la interacción de la radiación con la materia:

A muy altas energías ($E > 100$ MeV) los iones y electrones que penetran el sólido interactúan con los núcleos cargados de los átomos presentes en el sólido, y en presencia del campo eléctrico de los núcleos atómicos, los iones son desviados y se frenan emitiendo fotones con energías entre 1 y 100 keV (rayos X) que se conoce como radiación de frenado o “Bremsstrahlung” [38].

Por otro lado, cuando una partícula cargada pasa por un medio material ópticamente transparente, con velocidades mayores a la velocidad de fase de la luz c en ese medio, induce un momento dipolar eléctrico en el material y se emite radiación electromagnética de baja energía, por ejemplo, electrones rápidos moviéndose en agua producen la emisión de fotones en el rango del azul, llamada radiación “Cerenkov” [39]. Otro proceso que podría ocurrir a muy altas energías son las reacciones nucleares [40-41], por ejemplo cuando un protón con energías de 800 MeV incide sobre un blanco pesado, lo puede fraccionar en núcleos más chicos emitiendo partículas secundarias como neutrones, protones y gammas altamente energéticos.

A más bajas energías ($E < 100$ MeV), los procesos que dan lugar a la pérdida de energía en las partículas incidentes, con la consecuente transferencia de energía al medio, tienen que ver con la ocurrencia de eventos elásticos e inelásticos por colisión de partículas cargadas que interactúan con los electrones y los núcleos de los átomos dentro del sólido. La pérdida de energía por cada proceso se caracteriza mediante el poder de frenado (*Stopping Power*) $S(E) = -dE/dr$, que representa la cantidad de energía perdida por unidad de camino recorrido en el material.

En la Figura 2.2 se muestra la contribución de los poderes de frenado debido a las interacciones con los electrones y los núcleos de los átomos del sólido [42]. Se observa que la probabilidad de perdida de energía asociada al frenamiento electrónico domina al nuclear para energías mayores de 100 keV.

En el rango de 10 a 100 keV/amu, se alcanza el valor máximo de la curva del poder de frenado nuclear. La importancia relativa de ambos procesos depende fuertemente de la masa del proyectil, cuanto más liviano es éste último, el poder de frenado electrónico supera al nuclear a menores energías.

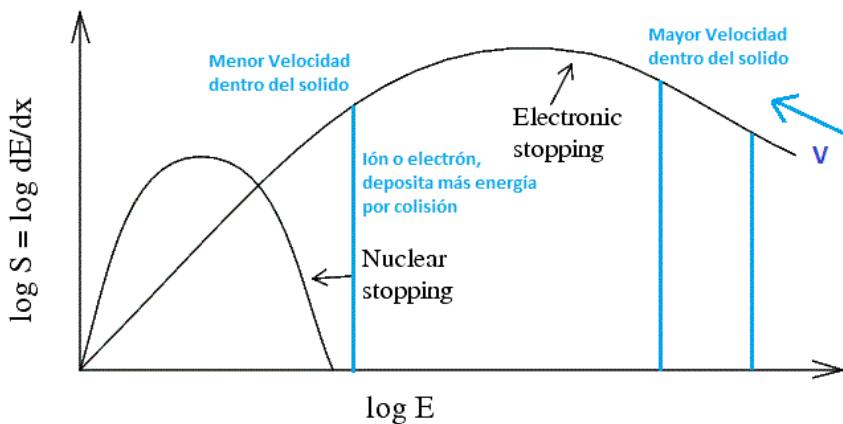


Figura 2.2 - Relación entre *stopping power* electrónico y *stopping power* nuclear. [41-42]

Teniendo en cuenta que el ambiente espacial para órbitas geoestacionarias está dominado por electrones con energías entre 0 y 4 MeV, protones hasta 100 MeV, y en mucho menor medida por partículas alfas, los procesos de frenamiento en el sólido están dominados por las interacciones con los electrones del mismo.

Otro concepto importante relacionado con el frenamiento de partículas es el Rango CSDA (Continuous Slowing Down Approximation) [43]. Éste representa la longitud promedio recorrida por la partícula en el medio material hasta que pierde toda su energía y queda en reposo. Se calcula integrando en energía (desde la energía inicial con la cual ingresa la partícula al material, hasta energía cero cuando se frena) la inversa del poder de frenado. En la Figura 2.3 se presenta el rango en función de la energía incidente del proyectil para electrones, protones y alfas incidiendo en Al y Cu. A modo de comparación se incluyen datos para radiación electromagnética que ha sido atenuada al 1 por mil de la intensidad inicial ($I = I_0 / 1000$).

Se puede observar en la Figura que la penetración de la radiación electromagnética es varios órdenes de magnitud mayor que la de las partículas

masivas. Por ejemplo, si se consideran gamas con energías incidentes de hasta 1 MeV, las longitudes de penetración pueden ser de varias decenas de centímetros. También se puede observar que para una dada energía el rango de penetración de electrones es mayor que el de los protones, y el de éstos mayor al de las partículas alfa. Por ejemplo, para 1 MeV en Cu, resultan aproximadamente 1mm, 10 μm y 2 μm , respectivamente.

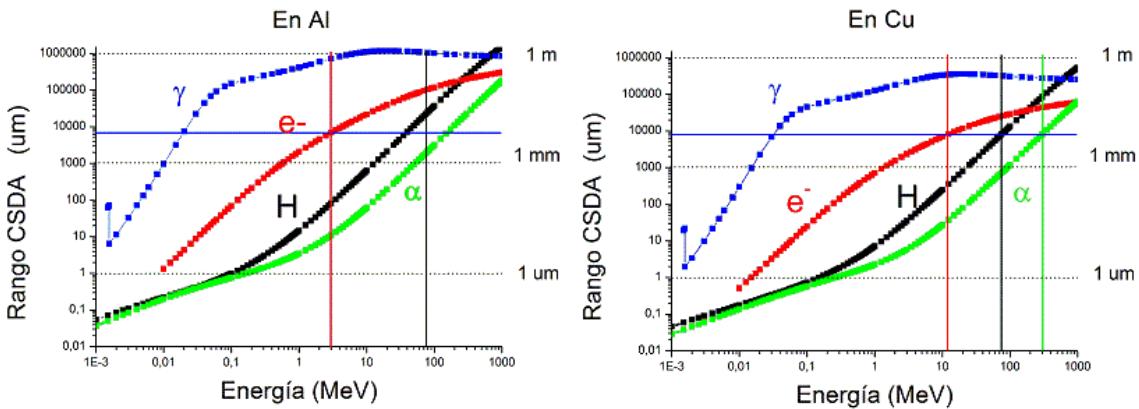


Figura 2.3 Rango CSDA de protones (H), electrones (e) y alfas (α) en aluminio (Al) y cobre (Cu), como función de la energía incidente. A modo ilustrativo se incluye el espesor de atenuación al 1 por mil de la radiación γ . Notar como para un mismo valor de energía, el rango es distinto para partículas cargadas con diferente masa [43].

2.1.2 BLINDAJES Y FILTROS DE ENTRADA

Como se presentará en las próximas secciones, cada detector del MARE consiste básicamente en un detector de partículas que puede medir la energía depositada en él (Surface Barrier Detector-SBD), rodeado de un material grueso (varios milímetros de espesor), con una apertura por donde puede ingresar la radiación al detector (ver por ejemplo el esquema del REM - Figura.1.10, o los diseños que se presentan en los ítems 2.1.5, 2.1.6 y 2.1.7 de éste capítulo).

El primer requerimiento para los detectores es que sean mecánicamente resistentes para soportar las fuertes aceleraciones que suceden durante el despegue del satélite, y que el material del soporte provea además el blindaje necesario para bloquear la radiación de más altas energías. Teniendo en

cuenta la composición del ambiente espacial (Figura 2.1), las curvas de rango de la radiación incidente (Figura 2.3), y el compromiso entre volumen ocupado por los detectores y el peso de los mismos, se decidió emplear preferentemente cobre con espesores de 8 mm. Esto asegura, sin contar el blindaje extra provisto por otras componentes del MARE y del satélite, que no se detectarán electrones ni alfas, ni protones de al menos 70 MeV de energía, a menos que ingresen por la apertura del detector.

Otro de los requisitos de los detectores es que se bloquee a la entrada toda luz proveniente del ambiente espacial. Esto se logra empleando láminas delgadas de aluminio con espesores de pocos $\sim\mu\text{m}$ a la entrada. Esto produce que las partículas que se pretenden medir pierdan energía al pasar la lámina, o se frenen completamente en ella si la energía es muy baja, por lo que la energía mínima detectable por el SBD estará definida por el rango de las partículas en este elemento. Por ejemplo, electrones de 0,04 MeV de energía se frenan en 10 μm de aluminio, por lo que no llegan al elemento sensible a la radiación, y no son detectados. Este efecto es mayor para partículas más masivas, por ejemplo, para el espesor mencionado se frenan protones de 1 MeV y alfas de 3 MeV.

Por otro lado, la geometría específica de la apertura en el blindaje determina la apertura angular del detector, es decir, el ángulo sólido subtendido por éste. Si se considera que el ritmo máximo de contaje queda definido por la electrónica del MARE (50000 partículas/s), y que es posible elegir detectores de barrera de superficie (SBD) con distintas áreas sensibles, el flujo máximo de cada detector queda definido por el área de éste y de su apertura angular ($\text{Flujo integral} = [\text{partículas/s.cm}^2.\text{sr}]$). Cuanto mayor es la superficie efectiva y mayor la apertura angular, mayor será la cantidad de partículas que pueden ser detectadas, permitiendo detectar flujos más bajos. Por otro lado, una superficie efectiva baja con una apertura angular baja, permitirá medir flujos más altos, para una misma tasa de contaje.

Resumiendo, el rango del flujo integral de partículas queda determinado por los siguientes tres parámetros de diseño de los detectores:

- 1) Su apertura angular, determinada por la geometría del blindaje,

- 2) Los valores máximo y mínimo del ritmo de conteo determinado por la electrónica analógica (Count Rate), y
- 3) El área efectiva de colección y detección de partículas en el elemento sensible a la radiación (Surface Barrier Detector).

2.1.3 DETECTOR DE BARRERA DE SUPERFICIE (SBD)

El elemento sensible a la radiación para el caso de los detectores del MARE está compuesto por detectores de barrera de superficie (Surface Barrier Detectors - SBD) [44-45]. Estos permiten determinar la energía depositada por una partícula cargada, midiendo la carga total Q que las partículas producen cuando atraviesan o se frenan en el detector. Su comportamiento es básicamente como el de un diodo de silicio polarizado en inversa. Al polarizar la juntura W en inversa (Figura 2.4), se aumenta la eficiencia en la colección de carga, pues se incrementa la magnitud del campo eléctrico forzando a que más cargas se desplacen de un tipo de material a otro (tipo -n, o -p). Cuando alguna radiación ionizante interactúa con el detector produce pares electrón-hueco que son rápidamente drenados por el campo eléctrico, formando un pulso rápido de carga (del orden de pocos \sim ns), proporcional a la energía depositada por dicha radiación en el detector [46-47]. El costo energético necesario para crear un par electrón-hueco en un SBD de silicio es de \sim 3.6 eV a una temperatura aproximada de \sim 298K, y mediante una electrónica analógica adecuada, es posible determinar la energía de la radiación ionizante que incide sobre el detector, midiendo la carga total generada en el mismo

$$Q_{total} = \frac{e}{3.6} Ein[eV]$$

El instrumento MARE utiliza detectores SBD de la empresa ORTEC, elaborados con un semiconductor de silicio tipo-p o tipo-n, al cual se le evaporan un contacto de Au y uno de aluminio Al en las superficies opuestas. Estos contactos se usan para polarizar el detector, y a su vez conformar el diodo. También usa detectores Implantados tipo ULTRA de la empresa ORTEC, que están formados por un semiconductor al cual se le implantan iones tipo-p de un lado y tipo-n del otro para formar el diodo. Luego se agregan los contactos por separado. [48]

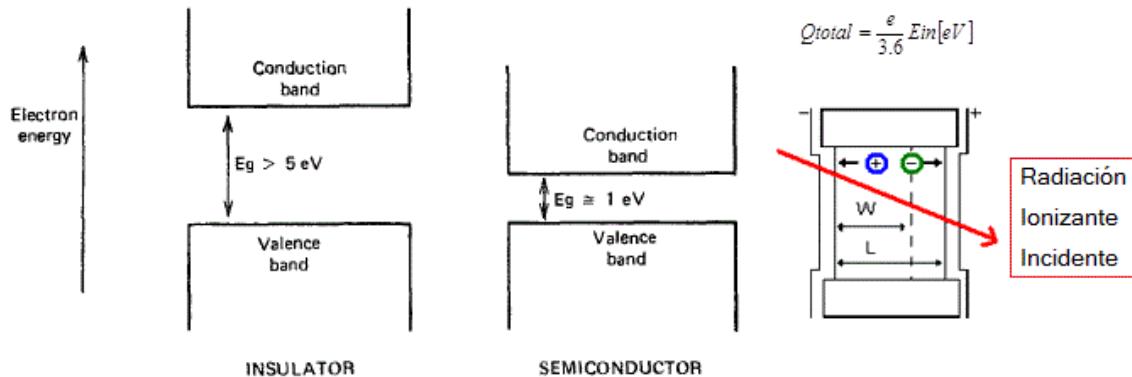


Figura 2.4 - (Izquierda) Costo energético de promoción de electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción en un aislante y en un semiconductor [46]. (Derecha) Esquema de funcionamiento de un detector de barrera de superficie SBD de silicio [49].

La diferencia entre los detectores de barrera de superficie SBD y los implantados, es que los SBD pueden ser totalmente depletados, lo que significa que todo el espesor del mismo es sensible a la radiación ionizante incidente, y se logran espesores en elementos comerciales de hasta 2000 μm . Por su parte los implantados no son completamente depletados y su espesor máximo sensible es de hasta 500 μm , parámetro que dentro del diseño de detectores, establece el valor máximo de energía que puede ser medida en el elemento sensible a la radiación [48].

2.1.4 DETECTOR LEEP (Low ENERGY ELECTRON PROTON)

El detector LEEP está diseñado para medir principalmente electrones y protones de baja energía presentes en el ambiente espacial, durante períodos de baja actividad solar debida a electrones y protones atrapados en los cinturones de Van Allen, y de alta actividad solar debida a explosiones solares. El LEEP se ubica dentro del instrumento MARE, en la dirección -Z (Figura 1.5), mirando hacia el sol de mediodía [10-11].

El detector fue diseñado para medir electrones y protones de bajas energías con un rango de flujos entre 3×10^2 a 2×10^8 partículas/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$) (Figura 2.1 líneas rojas). Para esto se eligió un área de colección de 7 mm^2 , un colimador de aluminio de 3.0 mm de diámetro y longitud de 4.3 cm, para

obtener una apertura angular total de 4° (cono con ángulo medio igual a 2°). En la Figura 2.5 se muestran los esquemas y dibujos del detector de vuelo junto con el prototipo desarrollado para los ensayos.

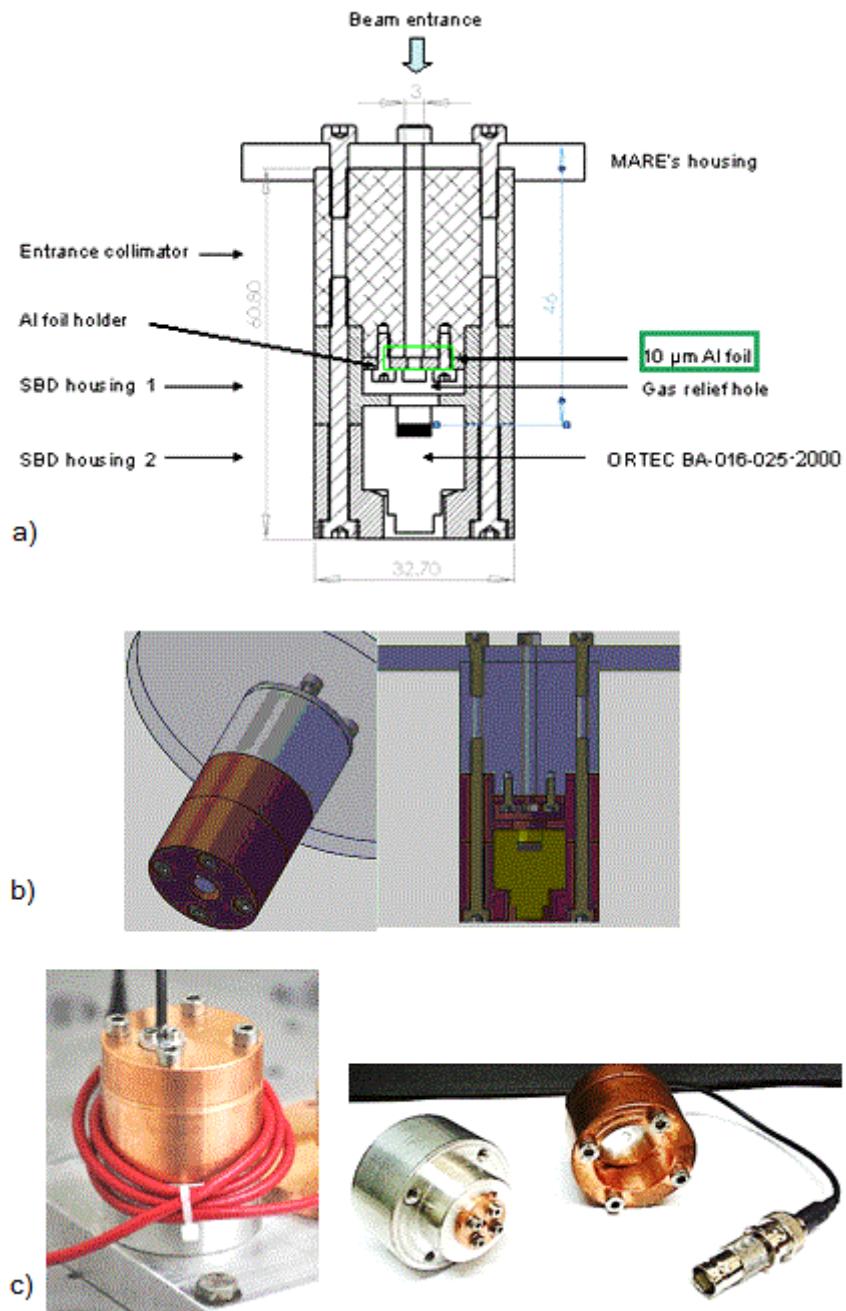


Figura 2.5 - a) Diseño del detector LEEP [10], b) Imagen 3D del detector LEEP [10], c) Prototipo del detector LEEP [37].

Como ya se comentó anteriormente, el objetivo del LEEP es medir la composición del ambiente espacial para las más bajas energías. Teniendo en cuenta que también es necesario bloquear la luz de entrada al detector para evitar señales espurias, se eligió un filtro de entrada formado por una lámina muy delgada de Al de 10 μm de espesor. Esto lleva a que las mínimas energías detectables (partículas que tienen suficiente energía para pasar el filtro) sean 0.03 MeV para electrones, 0.8 MeV para protones y 2.8 MeV para alfas.

Por otro lado, se requiere medir la energía de los electrones en el mayor rango posible. Si se requiriera medir hasta 4 MeV (ver Figura 2.6.a), el espesor sensible del material del detector (principalmente Si) resultaría de 9000 μm , lo que es muy difícil de conseguir. Los detectores SBD de la empresa ORTEC más gruesos tienen un espesor sensible de 2000 μm ; por lo que los límites de detección son de aproximadamente 1 MeV para electrones, 20 MeV para protones, y 75 MeV de alfas. Para el LEEP de vuelo se eligió el SBD *BA-016-25-2000* de la empresa ORTEC, y como prototipo se ensayó el *AA-018-100-2000*, ambos detectores de barrera de superficie con un espesor de 2000 μm .

La curva de respuesta del detector expresada como la energía depositada por cada partícula (energía que se mide) en función de su energía incidente se muestra en la Figura 2.6.b. En esta Figura se puede observar que la respuesta dista bastante de ser una línea recta como sería el caso de un detector sin filtro de entrada y con un espesor de SBD mucho más grande que el rango de las partículas. En la Figura 2.6.b se puede observar una caída abrupta en la energía depositada para bajas energías incidentes que refleja el hecho de la presencia del filtro de Al de 10 μm ; y la presencia de una energía máxima depositada en el detector por cada partícula refleja el hecho de que su espesor se limita a 2000 μm .

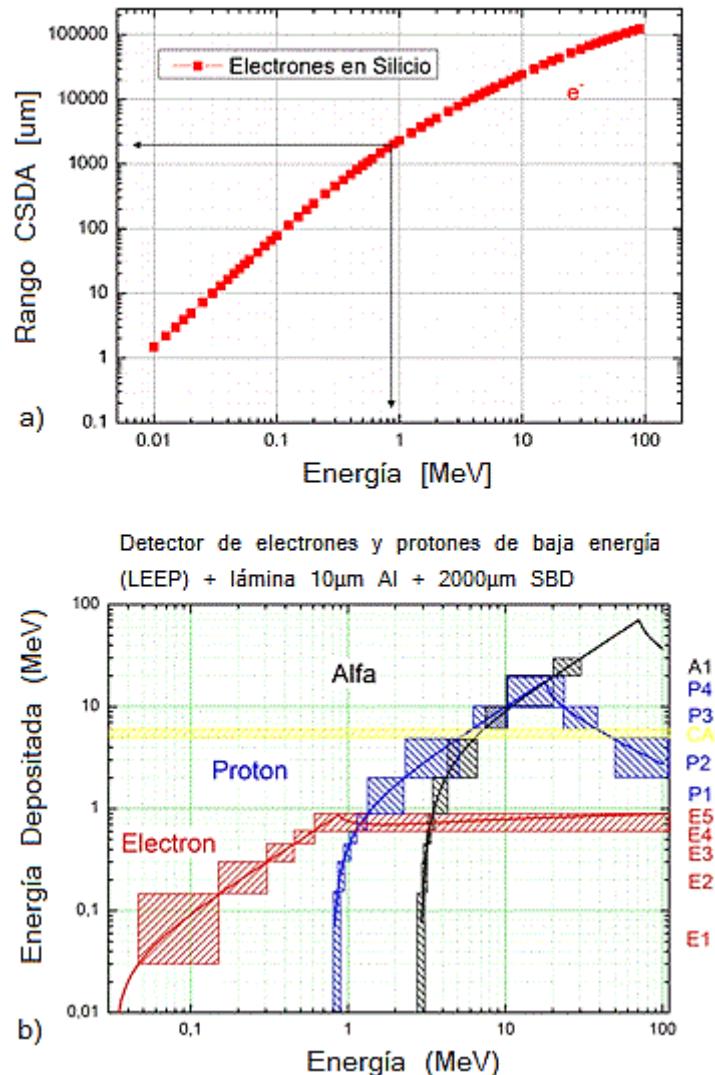


Figura 2.6 - a) Rango CSDA de electrones en silicio [43]. b) Energía depositada en función de la energía de la radiación ionizante incidente (Electrones, protones y alfas) en el detector LEEP. Los recuadros sombreados "Bins" representan rangos de energía depositada por cada partícula medida (Eje y), en función de los rangos de energía incidente (eje x). [10]

Como existe limitaciones en la cantidad de datos que puede transmitir el satélite a tierra, el espectro de energía que se mide, se condensa en pocos canales (*bins*): cinco para electrones (E1-E5), cuatro para protones (P1-P4) y uno para alfas (A1), según se identifican en la Figura 2.6.b. [10]

2.1.5 DETECTOR PT (PARTICLE TELESCOPE)

El detector de partículas cargadas PT, se diseñó para medir el flujo integral de protones y alfas de energías intermedias, “filtrando” a la entrada los electrones. Al igual que el LEEP, el PT se ubica dentro del instrumento MARE, en la dirección -Z (Figura 1.5), mirando hacia el sol de mediodía.

El detector se diseñó para medir flujos de partículas entre 4 y 2×10^6 partículas/(cm².s.sr). Para esto se eligió un área efectiva de colección igual a 50 mm² y un apertura angular total de 14º (cono con ángulo medio igual a 7º) dada por un cilindro de aluminio con diámetro 8 mm y 32 mm de longitud, que fija un par de imanes permanentes de neodimio que se encuentran en la entrada del detector (Figura 2.7).

Para bloquear la luz incidente se propuso utilizar una lámina delgada de aluminio de 4 µm de espesor ubicada frente al elemento sensible a radiación SBD. Esta lámina de 4 µm también frena protones con energías menores a 0.4 MeV y alfas con energías menores a 1.3 MeV [10].

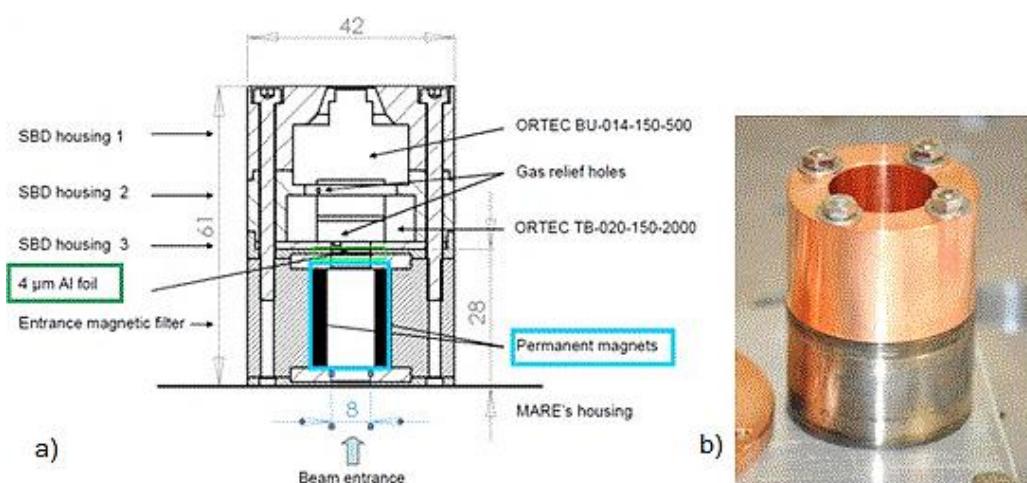


Figura 2.7 - a) Diseño del detector PT [10], b) Prototipo del detector PT incluyendo filtro magnético. [37]

Además de la lámina de aluminio se diseñó como filtro de entrada, un arreglo de dos imanes permanentes de neodimio montados paralelos de manera que sumen el campo magnético en la zona por donde deben pasar las partículas incidentes (Figura 2.7). La idea de este filtro es que a igual campo magnético, los electrones que tienen menor masa que otras partículas se desvían más, lo

cual puede utilizarse para desviar sus trayectorias, dejando pasar solo los protones y alfas. Se hicieron distintas simulaciones con el código SIMION V7 que mostraron que una configuración con dos imanes permanentes es mejor que un cuadrupolo para filtrar electrones con energías de hasta a 5 MeV, permitiendo el paso de protones con energías mayores a 0.4 MeV [10-11]. Los prototipos desarrollados (Figura 2.7) demostraron que es posible lograr un campo magnético de 0.3 T en la región de las trayectorias de entrada, siendo blindado rápidamente a 3×10^{-9} T a una distancia de 0,3 m por la cubierta (*Housing*) elaborada de acero carbono. Esto último es un requerimiento de la norma GDIR (General Design and Interface Requirement) que pide una reducción del campo magnético generado por cualquier subsistema del satélite a valores de 100×10^{-9} T a 1m de distancia [31].

Para medir la energía de los protones se propone un arreglo de dos detectores de barrera de superficie colocados uno detrás de otro (en modo telescopio), el primero un ORTEC *TB-020-150-2000* con 2000 μm de espesor y el segundo un ORTEC *BU-014-150-500* con 500 μm de espesor. La idea es que el primero mida el mayor rango de energías posibles, y con el segundo detector podemos identificar protones que tienen energías superiores a 20 MeV. La curva de respuesta del detector expresada como la energía depositada por cada partícula (energía que se mide) en función de su energía incidente se presenta en la Figura 2.8. El panel a) indica la asignación de canales cuando se detecta señal en el SBD1 (primer detector) pero no en el SBD2 (segundo detector). En el panel b) se indica la asignación de canales cuando se detecta señal en ambos detectores.

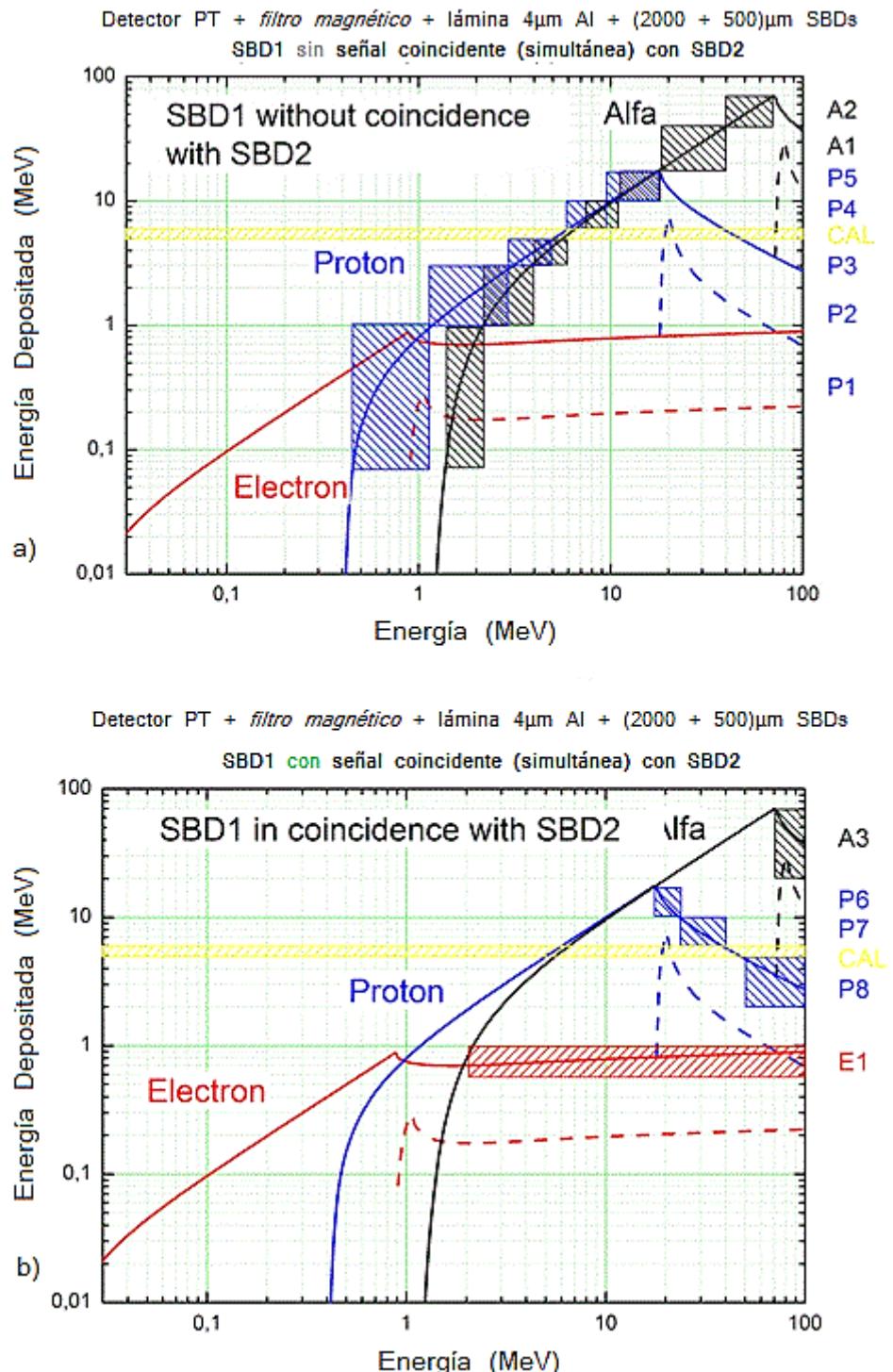


Figura 2.8 - Energía depositada en función de la energía de la partícula incidente (Electrones (E), protones (P) y alfas (A)) para ambos detectores SBD. Línea continua: SBD1 de 2000 μ m, línea punteada: SBD2 500 μ m). Los "bins" asignados cuando no hay una señal coincidente (simultánea) en el segundo detector (SBD2) se representan con bloques sombreados en el panel a). En el panel b) se presenta lo mismo cuando hay coincidencia de señales en ambos detectores. [10-11]

2.1.6 DETECTOR HEP (HIGH ENERGY PROTON)

El detector HEP está diseñado para medir el flujo integral de protones, con energías mayores a 40 MeV presentes en el ambiente espacial, durante períodos de baja actividad solar debida a protones atrapados en los cinturones de Van Allen, y de alta actividad solar debida a las explosiones solares. El HEP a diferencia del LEEP y del PT, se ubica en la dirección +X (Figura 1.5), mirando hacia el espacio exterior en la dirección Este del instrumento MARE.

El detector se diseñó para medir flujos de protones muy bajos, entre 1×10^{-2} a 5×10^3 partículas/cm².s.sr, por lo cual se eligieron como parámetros de diseño, un área de colección efectiva igual a 300 mm², y una apertura angular de 120º (cono con ángulo medio de 60º).

Para filtrar electrones con energías incidentes de hasta 4 MeV (prácticamente todo el espectro electrónico), se elige una lámina de tungsteno a la entrada del detector HEP, con un espesor de 1570 µm (1.57 mm), permitiendo medir protones con energías incidentes mayores a 40 MeV. (Figura 2.9). La elección del material tiene que ver con el hecho de que el tungsteno respecto del Cu o el Al, frena más eficientemente los electrones. Por ejemplo, para protones y alfas, 1570 µm de tungsteno y 7000 µm de aluminio tienen el mismo efecto desde el punto de vista de frenamiento, pero para esos espesores el tungsteno filtra hasta 4 MeV de electrones, mientras que el aluminio lo hace hasta 3 MeV. [10-11-43].

El HEP utiliza como elemento sensible a la radiación un detector ULTRA *BU-017-300-500* de la empresa ORTEC de 500 µm de espesor.

La curva de respuesta del detector expresada como la energía depositada por cada partícula (energía que se mide) en función de su energía incidente se muestra en la Figura 2.10 donde se muestra también la asignación de *bins* correspondiente [10-11-37].

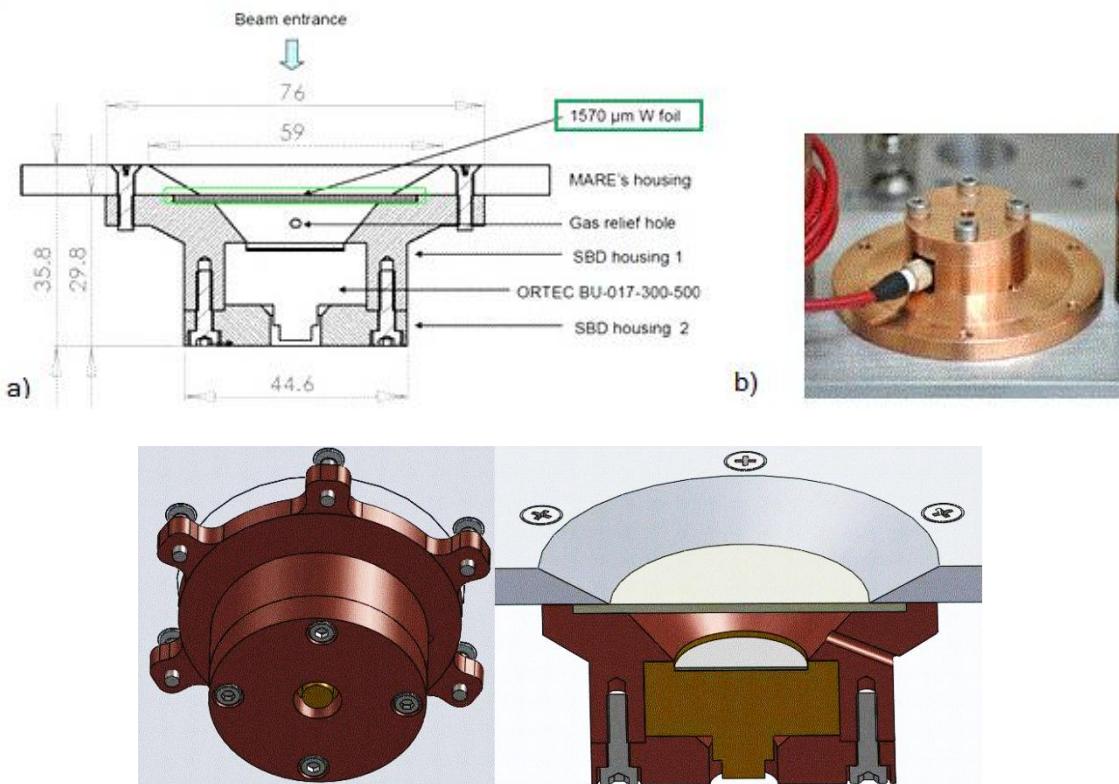


Figura 2.9 - a) Diseño del detector HEP [10-11-37], b) Prototipo del detector HEP [10-11-37], c) Diseño 3D del detector HEP. [10-11-37]

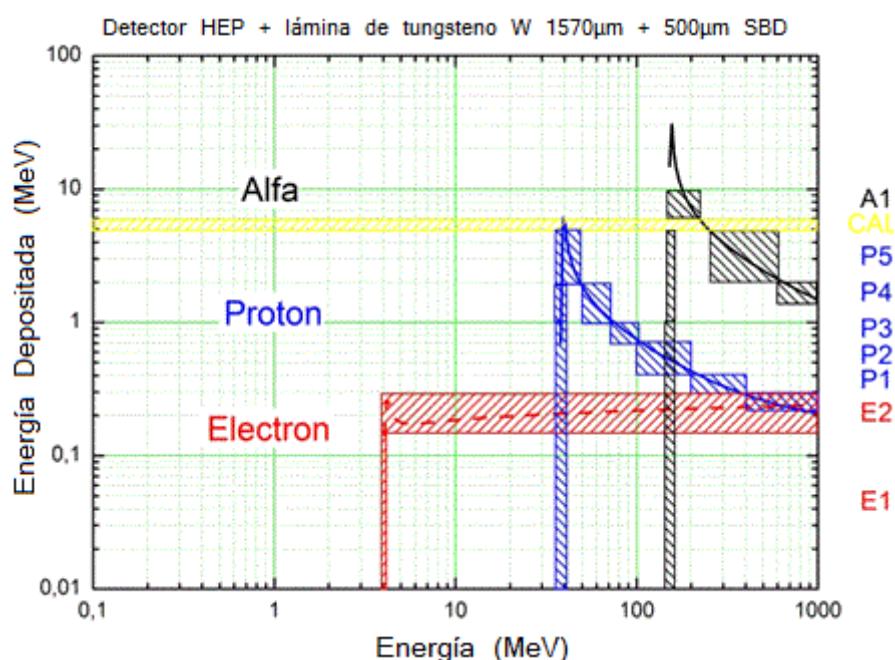


Figura 2.10 - Energía depositada en función de la energía de la partícula incidente para el detector HEP. Los "bins" sombreados representan rangos de energía depositada por cada partícula medida (Eje y), en función de los rangos de energía incidente (eje x). [10-11-37]

El "bin" indicado con CAL en cada uno de los gráficos de respuesta es un "bin" asignado para la calibración de cada uno de los detectores. Éste almacena información sobre la energía e intensidad de partículas alfa provenientes de una fuente de ^{241}Am de muy baja actividad (~ 9 partículas/s), es decir unas pocas partículas/s. [10-11-37]

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los parámetros de diseño de los detectores de radiación del instrumento MARE, y en la Figura 2.11 un dibujo esquemático de los detectores montados en el MARE, indicando la apertura angular (campo de visión) de cada uno de ellos.

LOW ENERGY ELECTRON & PROTON DETECTOR (LEEP)									
e^- : $0.03 < E < 1 \text{ MeV}$, H^+ : $0.8 < E < 20 \text{ MeV}$, α : $2.8 < E < 75 \text{ MeV}$									
Área de colección (mm^2)	Apertura angular Total ($^\circ$)	Espesor del SBD (μm)	Espesor lámina de Al (μm)	Imanes de Nd	Rango de Flujo Integral (part/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$))				
7	4	2000	10	No	3×10^2 to 2×10^8				
PARTICLE TELESCOPE DETECTOR (PT)									
e^- : $E > 5 \text{ MeV}$, H^+ : $E > 0.4 \text{ MeV}$, α : $E > 1.4 \text{ MeV}$									
Área de colección (mm^2)	Apertura angular Total ($^\circ$)	Espesor del SBD (μm)	Espesor lámina de Al (μm)	Imanes de Nd	Rango de Flujo Integral (part/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$))				
50	14	2000	4	Si	4 to 2×10^6				
		500							
HIGH ENERGY PROTON DETECTOR (HEP)									
e^- : $E > 4 \text{ MeV}$, H^+ : $E > 40 \text{ MeV}$, α : $E > 150 \text{ MeV}$									
Área de colección (mm^2)	Apertura angular Total ($^\circ$)	Espesor del SBD (μm)	Espesor lámina de W (μm)	Imanes de Nd	Rango de Flujo Integral (part/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$))				
300	120	500	1570	No	1×10^{-2} to 5×10^3				

Tabla 1. Resumen de parámetros de diseño, para los tres detectores (LEEP, PT y HEP) del instrumento MARE.

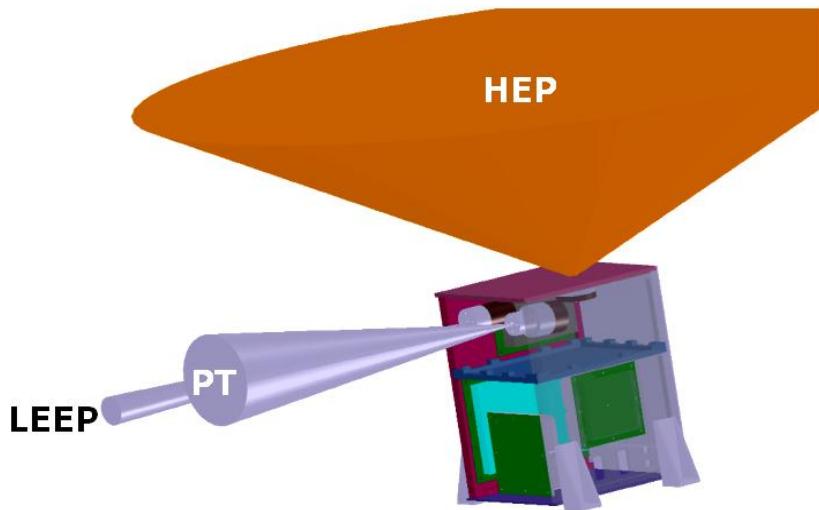


Figura 2.11 - Esquema de los detectores LEEP, PT y HEP instalados en el MARE, donde se indica la apertura angular de los mismos. [10-11-37]

2.2 CADENA ANALOGICA DE DETECCIÓN (ANALOG BOARD)

La electrónica analógica elegida para MARE está basada en elementos de la empresa AMPTEK, similares a los usados por los monitores CEASE y HEP (capítulo 1.2). Tiene por objetivo colectar la carga proveniente de los detectores SBD que resulta proporcional a la energía depositada por la radiación ionizante, hacer la integración y conformación de pulsos rápidos de carga para dar pulsos unipolares semi-gaussianos de ancho fijo, con la propiedad de que la altura es proporcional a la carga colectada.

2.2.1 PRE AMPLIFICACIÓN

La primera etapa de la electrónica analógica utiliza un pre-amplificador integrador de carga (A225F [50]) operado en modo "Sensitive Charge" (No amplifica tensión). Los pulsos de carga provenientes del detector los convierte en pulsos conformados cuya altura es proporcional a la carga colectada, con un tiempo de subida (*Rise Time*) de 2 μ s y un tiempo de bajada (*Fall Time*) de 8 μ s, dando un tiempo de pulso conformado total (*Shaping Time*) de 10 μ s.

Debido a que el pre-amplificador es un dispositivo activo que está polarizado con una tensión DC positiva (7 V) referida a tierra (GND) para su correcto funcionamiento, y que la salida de carga de los detectores SBD (entrada al pre-) están conectados a una alta tensión DC de polarización positiva de cientos de voltios (HV: *High Voltage*), es preciso usar un capacitor de desacople $C_{Desacop}$ ($\sim 10\text{nF}$) entre el detector y el pre-amplificador. Éste funciona como un filtro pasa altos, permitiendo mantener la tensión de polarización en el detector, y que el pulso rápido de carga pase a la etapa de pre-amplificación. Su efecto es la derivación del pulso rápido de carga, disminuyendo el ancho de pulso y filtrando las componentes de Fourier de baja frecuencia del mismo. (Figura 2.12). Por otro lado también es importante agregar entre la señal de entrada del pre amplificador y tierra, el capacitor C_{input} ($\sim \text{pF}$). Éste evita la generación de un ruido de alta frecuencia ($\sim 32\text{ kHz}$) que puede ser mayor que la señal del pulso de carga, debida a cambios de capacidad a la entrada del pre amplificador. (Figura 2.12)

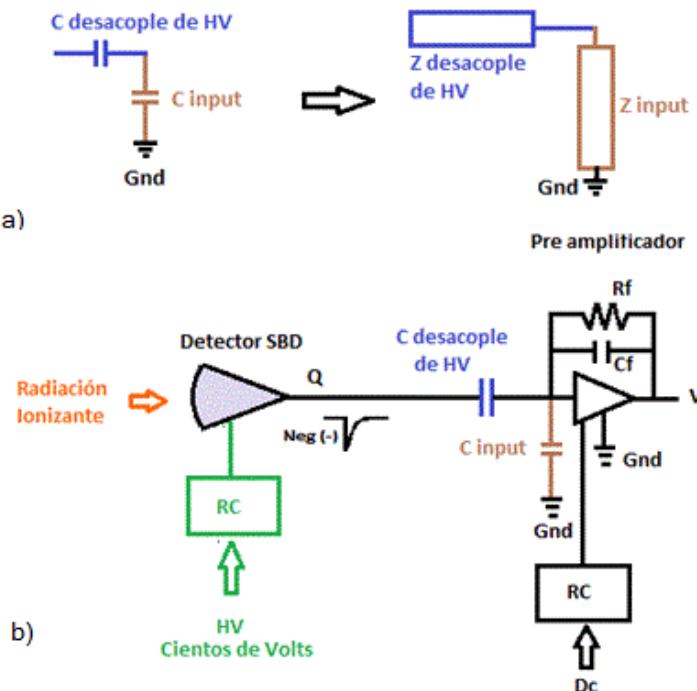


Figura 2.12 - a) Diagrama de impedancias capacitivas a la entrada del pre amplificador, b) Esquema del detector conectado con el capacitor de desacople de alta tensión al pre amplificador, elementos “sensitive charge” y filtros para fuentes dc, y fuentes de alta tensión HV.

Incluyendo al pre-amplificador los elementos C_{input} , C_f y R_f (Figura 2.12 b) se logra que éste trabaje en modo “Sensitive Charge”, donde el capacitor C_f se carga y descarga a través del resistor R_f (o alternativamente por un transistor con alta impedancia de entrada) con una constante de tiempo $\tau = R_f * C_f$, dando una tensión de salida $V_{\text{out}} \approx -Q / C_f$. De esta manera se logra conformar el pulso semi-gaussiano a la salida del pre-amplificador, con una ganancia que se ajusta eligiendo el valor de C_f , y cuya respuesta es proporcional a la carga colectada, es decir, a la energía depositada por la radiación ionizante en el SBD.

2.2.2 AMPLIFICACIÓN

La etapa siguiente en la cadena analógica de detección es la amplificación del pulso que sale del pre-amplificador. Su principal objetivo es proveer la ganancia en tensión necesaria al pulso conformado, sin modificar su ancho de pulso fijo, para que ingrese a un conversor análogo digital ADC con un rango de valores de tensión adecuados para elaborar el histograma de altura de pulsos (0-5V).

Por especificaciones del fabricante (AMPTEK), es necesario acoplar el pre-amplificador con el amplificador mediante el uso de un capacitor que llamaremos $C_{\text{input}2}$, para acoplar impedancias entre los dos dispositivos y eliminar el nivel de continua de 0,8 V de la salida del pre-amplificador [51]. El circuito además incluye un resistor R entre la entrada del amplificador y tierra, constituyendo un filtro pasa altos con efectos de diferenciación del pulso que sale del pre-amplificador, con constante de tiempo $RC_{\text{input}2}$. La cadena analógica implementada de vuelo, tiene un pulso de salida del amplificador con ganancia $A = V_{\text{out}2} / V_{\text{out}} \approx 2,5$, realizada con un amplificador A275FC con restauración de línea de base como se comentará en el ítem siguiente.

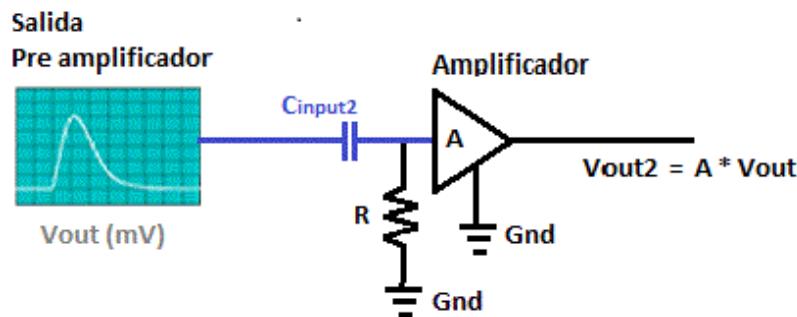


Figura 2.13 - Diagrama de amplificador y capacitor de acople entre pre-amplificador conformador de pulso y amplificador de tensión.

2.2.3 MÁXIMO CONTAJE Y RESTAURACIÓN DE LÍNEA DE BASE

El arribo de una partícula al detector se considera como un evento único, que se traduce en un pulso semi-gaussiano a la salida del pre-amplificador con ancho fijo de 10 μs , es decir, que para detectar dos partículas y conformar dos pulsos de forma separada, el pre-amplificador necesita un tiempo mínimo de discriminación entre dos eventos independientes igual a $T = 20 \mu\text{s}$, lo que da un valor de frecuencia máxima de discriminación de eventos (*Maximum Count Rate*) de 50000 partículas/s, si éstas llegaran temporalmente equi-espaciadas (Figura 2.14).

Como el amplificador tiene un tiempo de respuesta mucho más rápido (~ 100 veces) que el pre-amplificador, el conteo máximo alcanzado por la electrónica analógica está determinado por el tiempo mínimo de discriminación de dos eventos independientes del pre-amplificador.

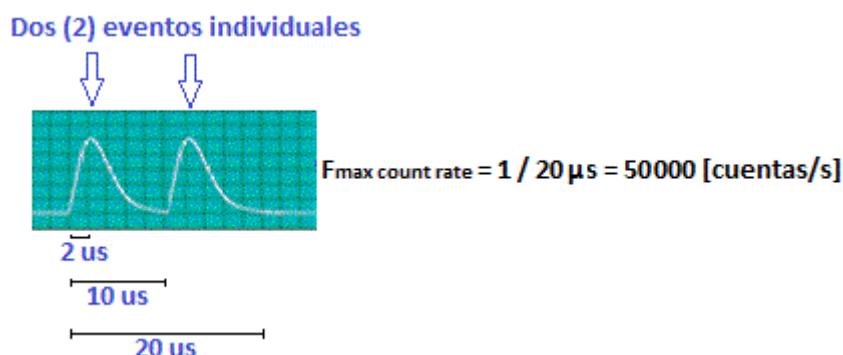


Figura 2.14 Determinación de conteo máximo de la electrónica analógica del MARE.

Usualmente la lectura de energía de los detectores se hace mediante un analizador tipo multicanal (MCA: Multi-Channel Analyzer), el cual elabora un histograma de altura de pulsos mediante la lectura de los máximos de los valores de tensión de los pulsos que ingresan al ADC respecto de masa (0 V). Cuando existe un alto conteo de partículas cargadas que llegan al detector debido a erupciones solares, (Por ejemplo en el caso del detector LEEP que debe medir un flujo integral máximo de $\sim 2 \times 10^8$ [part/cm².s.sr] a un conteo máximo de 50000 cuentas/s), el valor medio de la señal se hace mayor que cero (Figura 2.15a). Al emplear un sistema de amplificación con salida a través de un capacitor (C_{out2}), como en el caso de la cadena analógica conformada por los elementos A203-A206 de AMPTEK, ese valor medio de la señal se va a 0 V, por lo que la amplitud de los pulsos medidos por el MCA también se hace menor a la real, modificando la lectura de energía.

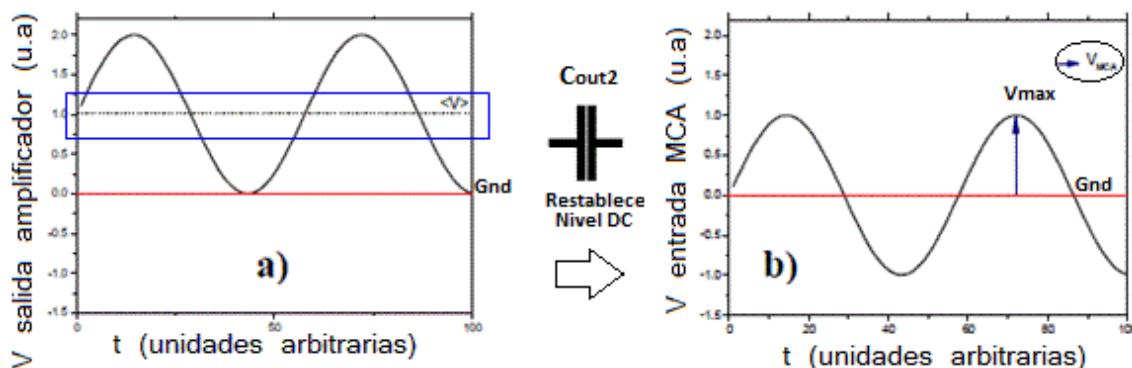


Figura 2.15 a) Corrimiento de nivel medio de tensión, que ocasiona un corrimiento en energías en el analizador multicanal (Colas de baja energía), b) Inclusión de capacitor C_{out2} para fijar nivel de continua tensión dc a la salida del amplificador (Caso electrónica no de vuelo AMPTEK A203-A206).

En el diseño actual del MARE, en lugar de usar una cadena de detección como la descrita, ésta incluye un amplificador A275FC con un restaurador de línea de base (BLR1: Base Line Restorer), que restablece el cero o referencia de tensión respecto a la cual el analizador multicanal mide el máximo de altura de pulso a la salida del amplificador [52], al valor mínimo y no al valor medio de la señal.

La implementación del BLR es importante, si se desea evitar mediciones erróneas de tensión por el MCA, cuando se tienen tiempos muy cortos entre pulsos sucesivos, con pendientes negativas (Flanco de bajada) que se pasan del cero. La Figura 2.16 muestra un circuito equivalente de BLR en el cual, el interruptor S está abierto durante la duración del pulso, y cuando éste termina, la llave S cierra el circuito, descarga el capacitor C a través de R, y restablece el cero en un tiempo $T = (R + Ro)*C$.

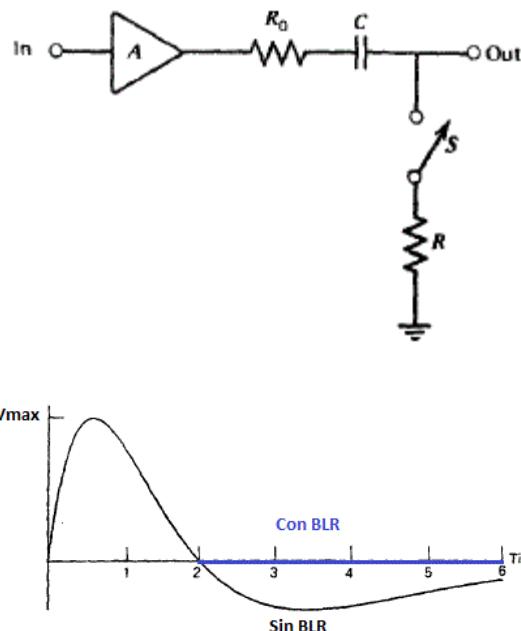


Figura 2.16 Circuito equivalente de un restaurador de línea de base BLR. Ro es la impedancia de salida del amplificador con ganancia A. La constante de tiempo está dada por el producto $T = (R + Ro)*C$. [53].

La Figura 2.17 muestra el circuito electrónico completo [27] para una única cadena de la electrónica analógica con los elementos descritos anteriormente marcados en recuadros color rojo, incluyendo un capacitor a la salida del amplificador de 10 nF para filtrar oscilaciones mayores a $\sim 3,2$ MHz, y el cambio en dos resistores: uno de $9\text{ k}\Omega$ en paralelo al capacitor de 10nF por uno de $2\text{ k}\Omega$, y otro de $2\text{ k}\Omega$ por uno de $1\text{ K}\Omega$, para ajustar la ganancia de salida del amplificador, antes de entrar al analizador multicanal MCA. Por otro lado en las Figuras 2.18 y 2.19 se muestran las fotografías de las placas de desarrollo implementadas sin reguladores de tensión de polarización para una sola cadena de detección, y las de vuelo implementadas con sus

reguladores de tensión de polarización y dos cadenas analógicas de detección completas, respectivamente.

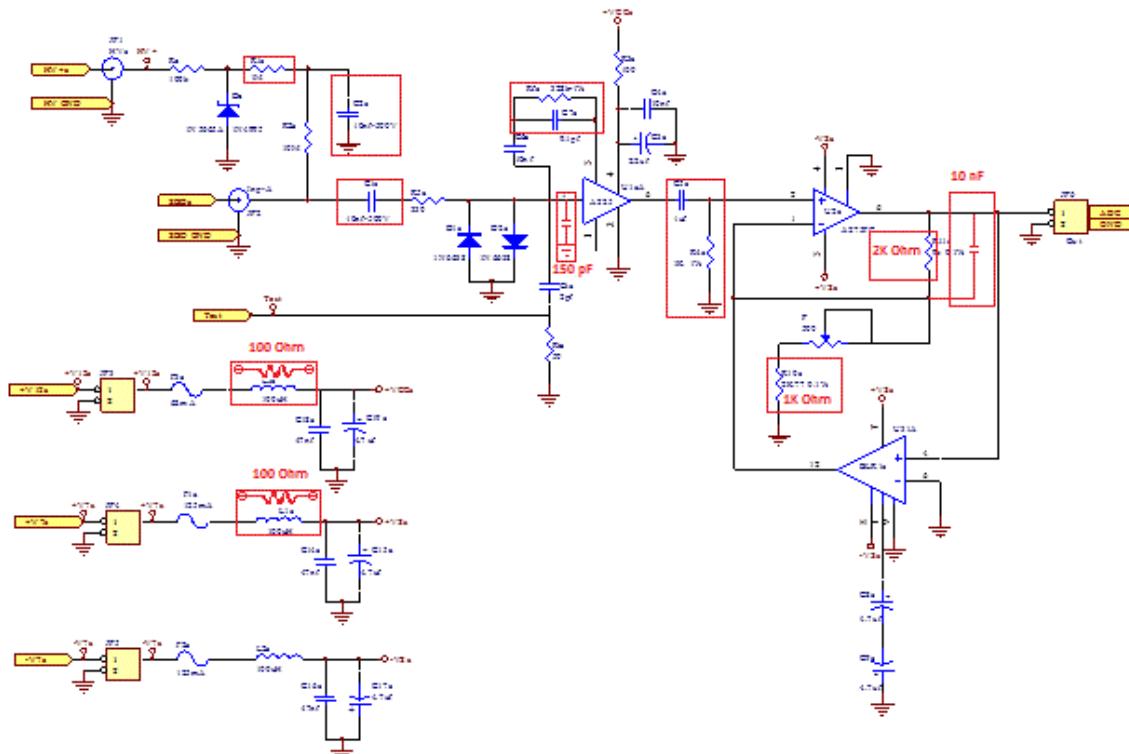


Figura 2.17 - Circuito electrónico completo de la placa analógica prototipo de vuelo propuesta para los elementos Pre-amplificador A225F, Amplificador A275FC, y Restaurador de línea de base BLR1 de la empresa AMPTEK [27].

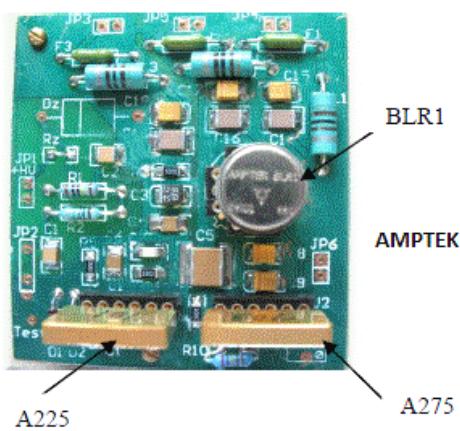


Figura 2.18 - Placa de desarrollo de la electrónica analógica para una única cadena de detección, donde se implementaron los elementos A225F, A275FC, y BLR1. [27]

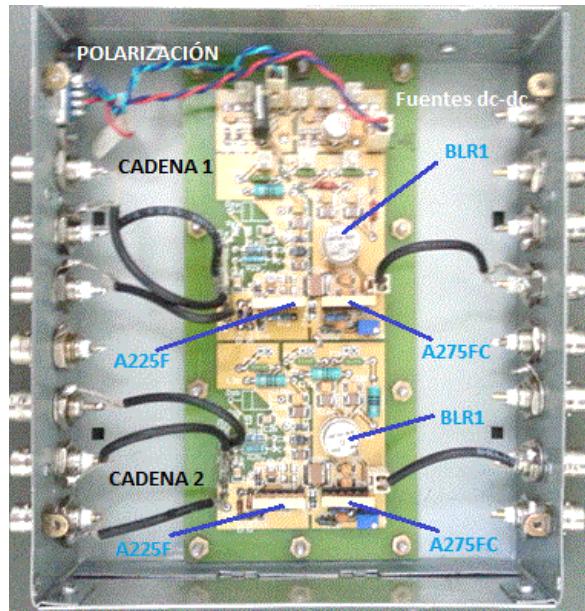


Figura 2.19 - Placa de vuelo desarrollada para la electrónica analógica, montada en su caja de blindaje para ensayos electrónicos y térmicos.

Más detalles de la electrónica analógica se pueden encontrar en las referencias [27-54-55-56-57]. En este punto se describieron los temas más relevantes, para luego discutir los resultados de su caracterización, presentados en el capítulo 3.

2.3 ELECTRONICA DIGITAL PARA EL INSTRUMENTO MARE (DIGITAL BOARD)

La electrónica digital del instrumento MARE tiene como requerimiento funcional principal, recibir los pulsos analógicos provenientes del amplificador A275FC, hacer la digitalización (Muestreo, retención, cuantificación y codificación) de pulsos unipolares semi-gaussianos analógicos de ancho fijo igual a $10 \mu\text{s}$, y clasificarlos en función de su altura máxima con valores de tensión entre 0 y 5 V [12-27-28]. En la Figura 2.20 representa un diagrama general del funcionamiento de la electrónica digital.

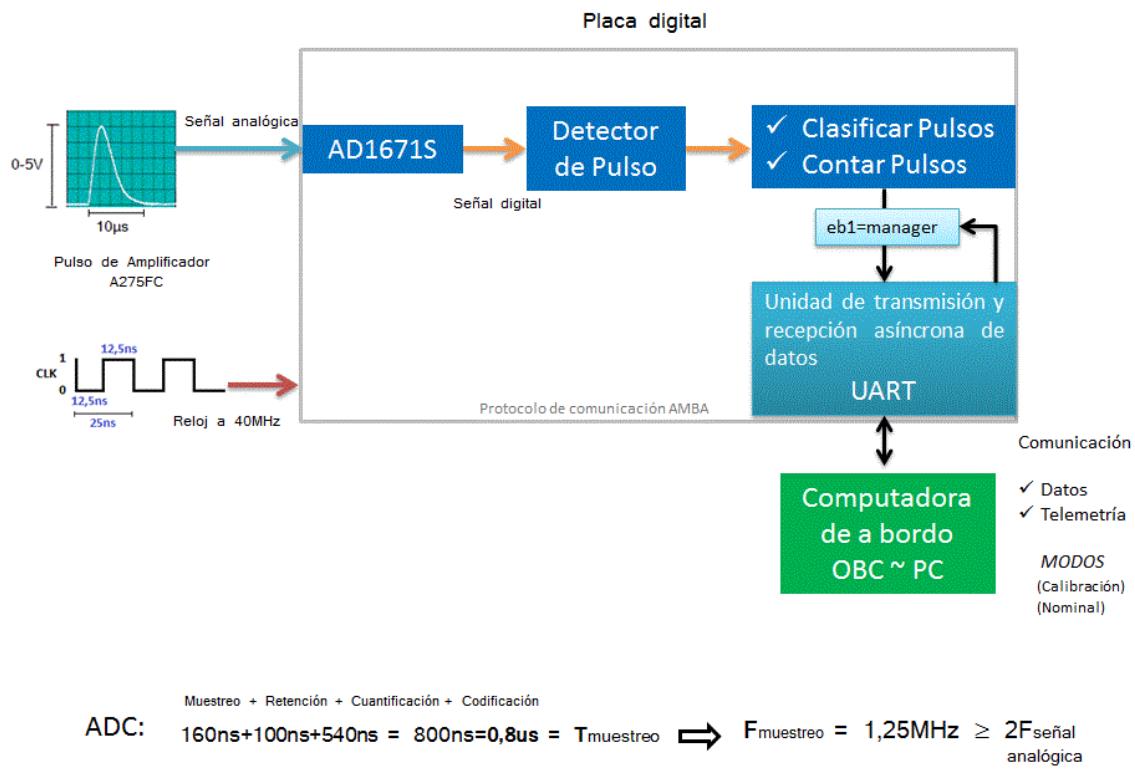


Figura 2.20 - Diagrama de funcionamiento de la placa digital del instrumento MARE.

2.3.1 ETAPA DE MUESTREO Y DETECCIÓN DE ALTURA DE PULSO

Los pulsos analógicos provenientes de la placa analógica con ancho igual a 10 μs son muestreados con un periodo de $T = 0,8 \mu\text{s}$ empleando un conversor análogo digital ADC (AD1671S). La frecuencia de muestreo está dada por los tiempos de muestreo y retención (respuesta del ADC de 160 ns), la etapa de cuantificación (100 ns) y la etapa de codificación de la señal (540 ns) para un total de 1,25 MHz. La cantidad total de muestras posibles con esa frecuencia es de 12 puntos de muestreo como se observa en la Figura 2.21.

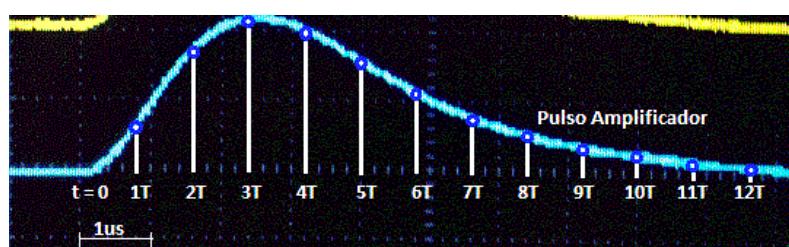


Figura 2.21 Digitalización de un pulso de 10 μs a la entrada del AD1671 con una frecuencia de 1,25 MHz.

La detección del pulso se inicia cuando se detecta la existencia de un flanco ascendente (~ 3 ms), y para determinar su máximo se adquieren 11 datos (muestras) que se asignan a un registro de 10 bits cada uno. Para detectar el máximo del pulso, el algoritmo programado es tal que la lectura debe cumplir las siguientes las condiciones:

- 1) Se calcula la derivada numérica de segundo orden de la señal muestreada $M(x)$:
$$\text{DER} = M(x-1) + M(x+1)$$
- 2) Se debe cumplir que haya cruce por cero de la derivada calculada:
$$\text{DER}(x-1) > 0 \text{ y } \text{DER}(x+1) < 0$$
- 3) Se debe cumplir que la muestra analizada $M(x)$, tenga un valor máximo en la cercanía para un valor anterior y un valor posterior a x :
$$M(x) \geq M(x-1) \text{ y } M(x) \geq M(x+1)$$
- 4) Al cumplirse que una muestra analizada $M(x-1)$ no cumplió con las condiciones de 3), es decir que no es mayor que $M(x)$ ni mayor a $M(x+2)$ entonces hay un máximo en $M(x)$.
- 5) Si se cumple lo anterior, entonces se habilita una bandera “flag” para la existencia de un máximo, es decir se confirma la existencia de un pulso bueno, y se pasa como un nuevo evento a las etapas siguientes correspondientes a clasificar y contar pulsos buenos según se indica en la Figura 2.20. [28]

2.3.2 COMUNICACIÓN CON LA COMPUTADORA DE ACTA (OBC)

La comunicación y envío de datos a la computadora del acta (OBC) debe hacerse con una velocidad de transmisión igual a 115,200 bps, empleando un protocolo de comunicación serial RS-422, para que ella procese y clasifique pulsos con contajes máximos de 50000 pulsos/s (Contaje máximo dado por la electrónica analógica ver sección 2.2).

En la placa digital prototipo descrita con mayor detalle en la sección 2.3.4, se emplea una PC y el software Visual Basic para elaborar el histograma de altura de pulsos, lo que haría las veces de ACTA-OBC. La computadora se

comunica con la placa prototipo mediante el protocolo de comunicación RS-232, a una tasa de 115,200 bps, para recepción de datos relacionados con los pulsos digitalizados y la telemetría para el manejo de tiempos y configuración del proyecto MARE. [28]

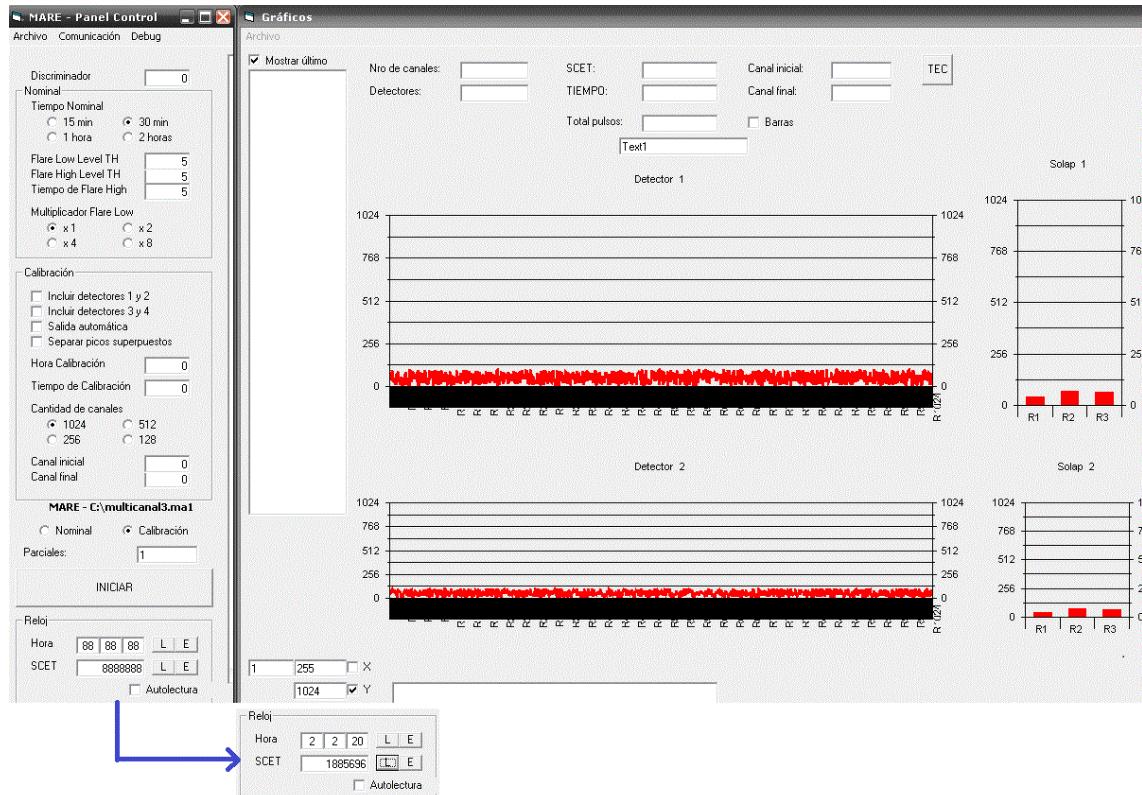


Figura 2.22 - Consola de usuario proyecto MARE en Visual Basic, que haría de computadora de a bordo ACTA-OBC.

2.3.2.1 MODOS DE OPERACIÓN

El MARE tiene básicamente dos modos de operación: el Modo Calibración, y el Modo Nominal. En el Modo Calibración el MARE debe funcionar como analizador multicanal durante un tiempo predeterminado entre 5 y 10 minutos, que puede repetirse cada 24 horas. En éste modo se emplea una fuente emisora de partículas alfa de ^{241}Am ($E \sim 5,48$ MeV) con baja actividad para verificar la calibración del espectro de energías (ganancia de la cadena analógica), y el espectro de hasta 1024 canales con una resolución de 10 bits debe ser transferido a la ACTA-OBC para su posterior bajada a tierra. [10-30]

Fuera del Modo Calibración, el MARE permanece en el Modo Nominal tomando datos del ambiente espacial, y comprime el espectro de 1024 canales en el cual pueden existir picos asociados a electrones, protones y alfas, a un espectro reducido de una docena canales (Bins), dependiendo de la asignación específica para cada detector. [28]

Dentro del Modo Nominal existen sub-modos de operación relacionados con las fuertes variaciones de contajes por ocurrencia de erupciones solares (Flares). Si esto último ocurriese, los detectores medirían un incremento en el ritmo de contaje y si superase un dado valor umbral (**Flare High Level**), el sistema pasa a modo *Flare High* (Altos contajes) disminuyendo el tiempo de lectura en cada detector para que la memoria no sature (se hacen lecturas más frecuentes). Si el ritmo de contaje baja, pero todavía es superior al fondo de radiaciones, el sistema pasa al modo *Flare Low* (Bajos contajes) aumentando el tiempo de contaje por detector; y finalmente, si el nivel de contaje es el esperado para épocas de baja actividad, el sistema vuelve al Modo Nominal. [28]

2.3.3 ASIGNACIÓN DE BINES PARA LOS DETECTORES POR RESTRICCIONES DE TELEMETRÍA

El detector PT está diseñado para medir protones y alfas, filtrando la mayoría de los electrones, en una configuración de telescopio formada con dos detectores (SBD1 y 2). Para ello es necesario ajustar la ganancia de la etapa de amplificación (Ver sección 2.2) a un máximo de energía de 70 MeV para el SBD1 y de 30 MeV para el SBD2, para cubrir todo el rango energético de las partículas incidentes. Considerando que la resolución utilizada en los ADC (AD1671) para cada detector es de 10 bits, se tendrá una resolución en energía para el SBD1 de 70 keV (70 MeV / 1024 canales), y para el SBD2 de 30 keV (30 MeV / 1024 canales).

La tasa promedio de envío de datos para comunicación entre la computadora del ACTA-OBC y tierra a través de la telemetría de la plataforma del satélite ARSAT-1, tiene como requerimiento de rendimiento una transferencia de datos

menor a 15 bps, por lo que es necesario reducir la cantidad total de datos (1024 canales por cada detector SBD) que se desean transferir a tierra, a un espectro comprimido de 13 bins. La asignación de bins presentada anteriormente en la Figura 2.8, se muestran ahora en la Tabla 2 [10-37] donde se detallan los rangos de canales asociados a los rangos de energías depositadas en los dos SBD para cada bin correspondiente a la detección de protones en los casos coincidentes y no coincidentes (Desde P1 hasta P8). Se muestran también los correspondientes a partículas alfa (Desde A1 hasta A3), y al canal de calibración (CAL) destinado al monitoreo de la calibración del detector cuando MARE opera en Modo Calibración.

Bin	Energía depositada en el detector SBD1 (MeV)	ADC1 Canales	Energía depositada en el detector SBD2 (MeV)	ADC2 Estado	Electrones	Protones	Alfas
					Energía incidente (MeV)	Energía incidente (MeV)	Energía incidente (MeV)
E1	0.6 - 1	8 - 14	0.1 - 0.3	Verdad	1 << E		
P1	0.07 - 1	1 - 14		Falso		0.4 < E < 1.2	1.4 < E < 2.2
P2	1 - 3	14 - 42		Falso		1.2 < E < 3	2.2 < E < 3
P3	3 - 5	43 - 71		Falso		3 < E < 5	3 < E < 6
P4	6 - 10	86 - 143		Falso		6 < E < 10	7.5 < E < 11
P5	10 - 17	144 - 243		Falso		10 < E < 17	11 < E < 17
P6	10 -17	144 - 243	2 -7	True		17 < E < 30	
P7	6 - 10	86 - 143	1.2 - 2	Verdad		30 < E < 50	
P8	2 - 5	29 - 71	0.2 - 1.2	Verdad		50 < E < 100	
CAL	5 - 6	72 -85	5 - 6	72 - 85			5.5 Am fuente 220
A1	17 - 40	243 - 571		Falso			17 < E < 40
A2	40 - 70	572 - 1024		Falso			40 < E < 70
A3	20 - 70	572 - 1024	10 - 30	Verdad			70 < E

Tabla 2 - Asignación de canales reducidos para el detector PT. [10-37]

	Electrones			Protones			Alfas		
	Energía incidente (MeV)	Mínimo contaje (Cuentas/s)	Máximo contaje (Cuentas/s)	Energía incidente (MeV)	Mínimo contaje (Cuentas/s)	Máximo contaje (Cuentas/s)	Energía incidente (MeV)	Mínimo contaje (Cuentas/s)	Máximo contaje (Cuentas/s)
E1	4 << E	0.0006	60						
P1				0.4 < E < 1.2	0.83	55000	1.4 < E < 2.2	0.0018	144
P2				1.2 < E < 3	0.06	4000	2.2 < E < 3	0.0014	112
P3				3 < E < 5	0.024	1600	3 < E < 6	0.0015	120
P4				6 < E < 10	0.02	1300	7.5 < E < 11	0.0005	40
P5				10 < E < 17	0.011	700	11 < E < 17	0.00025	20
P6				17 < E < 30	0.006	400			
P7				30 < E < 50	0.003	160			
P8				50 < E < 100	0.001	80			
CAL							5.5 Am source 220	9 max	9 max
A1							17 < E < 40	0.00009	7
A2							40 < E < 70	0.000009	0.7
A3							70 < E	0.000002	0.02

Tabla 3 - Mínimo y máximo contaje simulado según la asignación de canales propuesta y la integral del flujo de partículas del ambiente espacial. [10-37]

En la Tabla 3 se muestran los valores de conteo máximo y mínimo esperado para las condiciones de mínima actividad solar, y cuando aparecen erupciones solares. Si bien en la asignación de bins se prevé uno para electrones (E1), se observa que al filtrar electrones a la entrada del detector PT, no se espera tener cuentas debidas al arribo de éstos para energías menores a 4 MeV, por lo cual los conteos y en consecuencia el flujo integral de partículas cargadas que arriban al detector, será asignado a los bins destinados a detectar protones y alfas. Aquel que define el rango máximo de operación del PT en condiciones de flares corresponde a los protones de más bajas energías (P1), donde se ajustaron los parámetros del detector (aceptación angular y área de colección) para un conteo máximo de 50000 cuentas/s.

En el caso de los detectores LEEP y HEP también existen tablas de asignación de canales reducidos y de espectros de energía simulados, con la respectiva asignación de bins. [10],[11],[37]

LEEP: Este detector cuenta con cinco bins asignados para medir electrones con energías incidentes entre 0.03 y 0.6 MeV (E1-E5), cuatro bins para detectar protones con energías incidentes entre 0.9 y 20 MeV (P1-P4), y un bin para detectar partículas alfa con energías entre 20 y 30 MeV (A1) (Ver Figura 2.6).

HEP: Este detector cuenta con cinco bins asignados para medir protones con energías mayores a 40 MeV (P1-P5), un bin detectar para alfas con energías incidentes mayores a 100 MeV (A1), y dos bins para electrones con energías menores a 4 MeV (E1,E2) (Ver Figura 2.10).

Los rangos de energía y flujos integrales de cada detector se muestran en el resumen de parámetros de diseño de los detectores del instrumento MARE. (Ver Tabla 1). Más detalles de flujos estimados y bins asignados para cada detector se pueden encontrar en las referencias [10-30-37]. En este punto se describieron los temas más relevantes, para luego describir la placa digital prototipo implementada y algunos resultados de su caracterización, presentados en el capítulo 5.

2.3.4 MODELO DE DESARROLLO DE PLACA DIGITAL PARA EL INSTRUMENTO MARE

El modelo de desarrollo se armó empleando conversores analógicos - digitales AD1671S de la empresa *Analog Devices* [58] con una resolución máxima de 12 bits, una FPGA PROASIC3-A3P600-PQ208 de la empresa *ACTEL* y una unidad de transmisión y recepción asíncrona (*Start - trama de datos - Stop*) UART para interfaz con la computadora mediante protocolo de comunicación serial RS-232. El protocolo RS-232 (*Interfaces no equilibradas*) que usa el modelo de desarrollo emplea dos hilos (transmisión, recepción) y una línea común de referencia a tierra, con el cual se determina un "0" (Tensión positiva (+) respecto a masa) o un "1" lógico (Tensión negativa (-) respecto a masa), y distancias máximas de transmisión del orden de ~15 m. Por su parte el protocolo de comunicación RS-422 (*Interfaces equilibradas*) como requerimiento para MARE en su versión de vuelo, trabaja en forma diferencial con solo dos hilos (Transmisión, recepción) sin una línea común de referencia a masa, con lo cual los "1" y "0" lógicos se establecen en función de la diferencia de tensión ΔV_{AB} entre ambos conductores, con distancias máximas de transmisión del orden de ~1300 m. Los dos protocolos de comunicación pueden transmitir a una velocidad (Bit Rate) de 115,200 bps (bits/s) en modo Full dúplex que permite la comunicación bilateral simultánea entre transmisor y receptor de datos, usando la puerta serie con conector DB9 para transmisión y recepción con la computadora (Puerto COM1) empleando un *MAX 3224E/3225E* de la empresa *MAXIM* [59], el cual adapta niveles de tensión entre señales TTL (0 y 5 V) y niveles RS-232 (-15V y +15V), mediante los capacitores C1, C2, C3 y C4. (Ver Figura 2.23)

También es posible realizar comunicación serial virtual JTAG "Join Test Action Group" nombre dado a la norma IEEE 1149.1 "Standard test access port and boundary scan architecture", es decir, utilizando la puerta usb (Puerto COM3 y COM4) para transmisión serial virtual empleando la placa FTHL de EMTECH. Esto se usó para comunicación y envío de datos entre la FPGA (Field Programmable Gate Array) y la PC que hace las veces de OBC (Caso 1), o para la actualización de lectura de tiempos relacionados con la adquisición, elaboración del espectro de altura de pulsos y modos de operación del MARE

en Visual Basic, pero en este caso empleando datos que ingresan por el puerto COM1 (Caso 2).

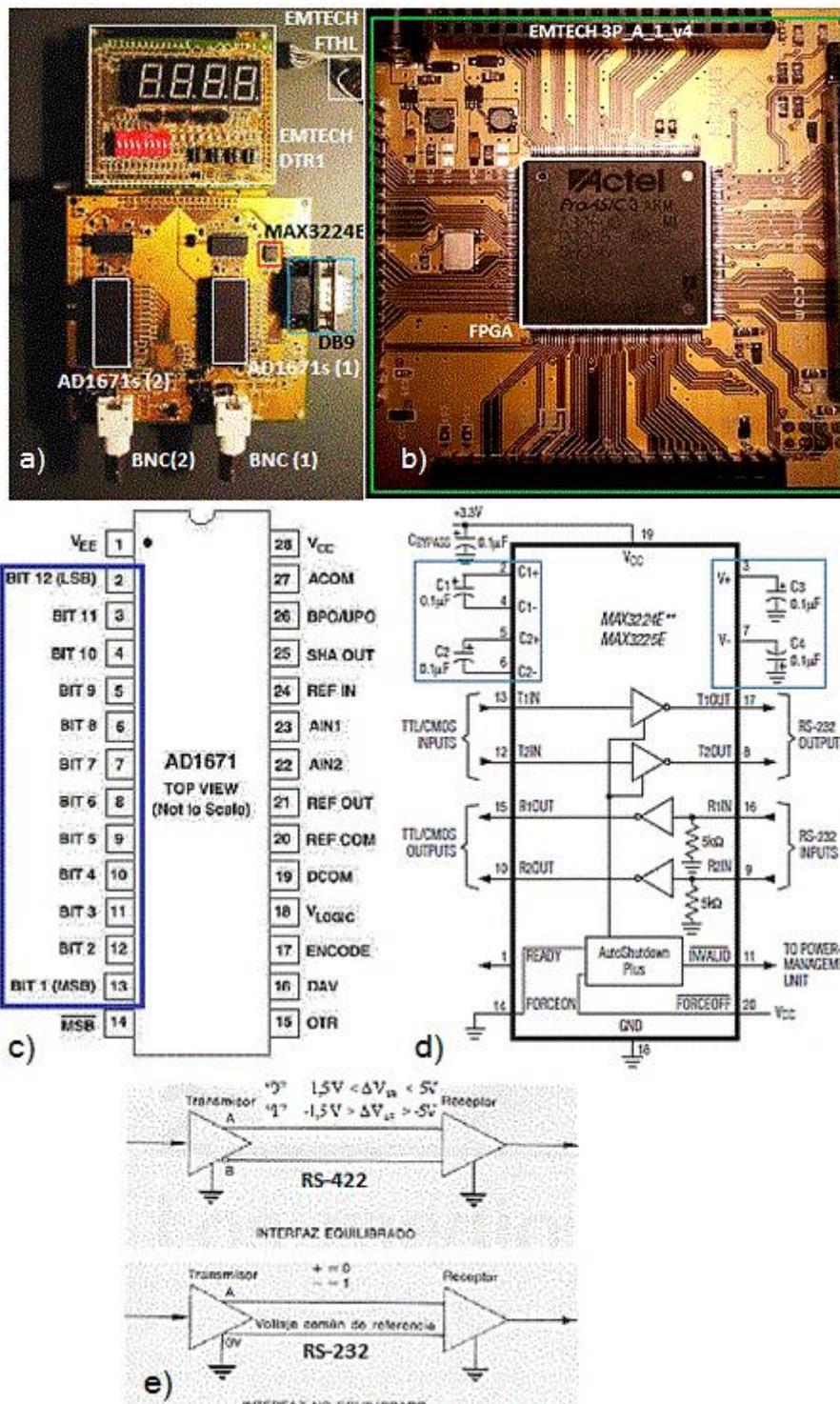


Figura 2.23 a) Placa prototipo del desarrollo de la electrónica digital donde se observan los dos AD1671S para digitalizar pulsos provenientes de dos detectores del MARE juntos con sus entradas vía conectores BNC, el MAX3224E/3225E, el conector DB9 de salida de datos hacia la computadora, y las placas EMTECH DTR1 y FTHL para conexión por USB, b) FPGA ACTEL PROASIC3-A3P600-PQ208 incluida en la placa EMTECH 3PA1_v4, c) Conversor análogo a digital AD1671S de Analog Devices [58], d) MAX3224E / 3225E [59] e) Comunicación serial RS-232 y RS-422.

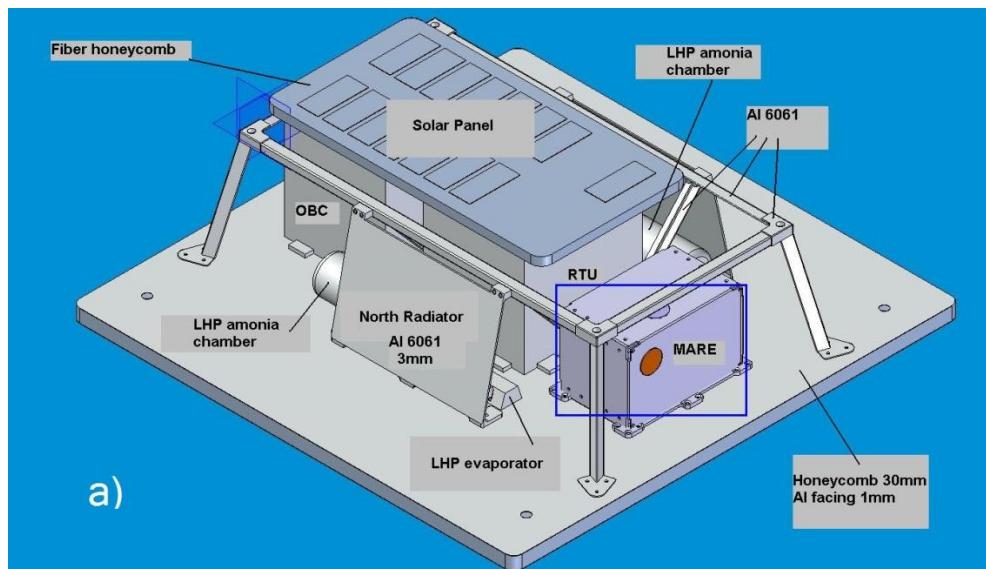
Las referencias más relevantes (Libros, pdf, tutoriales online y páginas web) utilizadas para entender la electrónica digital de los proyectos MARE y MULTICANAL, códigos de programación en VHDL y VB6 se citan en la referencia [60] de la bibliografía.

2.4 CICLOS TÉRMICOS DEL MARE

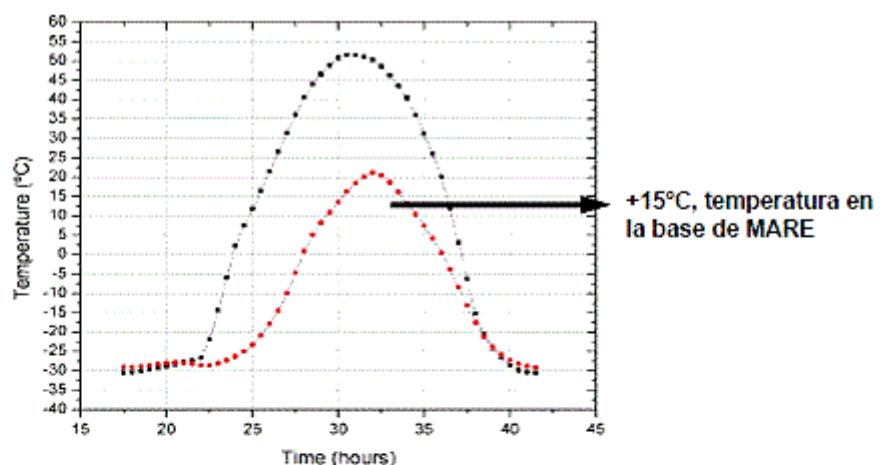
Las variaciones térmicas a las cuales estarían sometidos los detectores del MARE, están determinadas por la potencia que disipa el MARE, y el sistema del control térmico del ACTA que interactúa con las fuentes que dan calor proveniente del satélite, del espacio exterior, y principalmente por la radiación solar incidente.

En la Figura 2.24.b se muestra el MARE instalado en el ACTA junto con las variaciones de temperatura o ciclos térmicos sufridos por los radiadores del ACTA y en los detectores del MARE. La simulación de los cambios térmicos en los detectores fue realizada por el grupo GEMA (Universidad Nacional de la Plata Argentina) [36] considerando las simulaciones de temperaturas de la base del MARE suministrados por ACTA.

Se puede observar que la variación de temperatura en el MARE estará entre -10°C y $+40^{\circ}\text{C}$ cuando esté en órbita. Según las especificaciones técnicas de los componentes más sensibles utilizados en las placas de la electrónica analógica y digital, éstos están dentro de los valores de temperatura de operación sugeridos por sus respectivos fabricantes. Sin embargo, hay que hacer pruebas de ciclado térmico en el laboratorio de las placas armadas a fin de cotejar que, por ejemplo, no aparezcan ruidos espúreos, o que la ganancia de la cadena de detección cambie con la temperatura; y para el caso de los detectores SBD propuestos, que su performance sea adecuada al presente proyecto ya que no se cuenta con información detallada para cada uno de ellos.



a)



b)

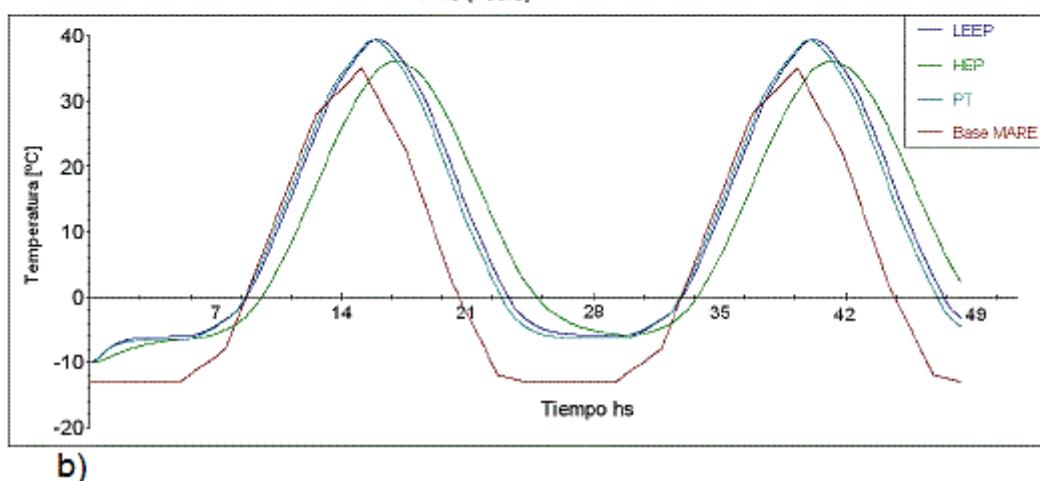


Figura 2.24 a) Instrumento MARE en ACTA, b) Temperaturas de la base del MARE suministrada por ACTA en función del tiempo [36], b) Temperatura en los detectores del instrumento MARE en función del tiempo. [36-37]

CAPÍTULO 3

3 IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA

En el desarrollo de esta tesis lo primero que se hizo fue estudiar el funcionamiento de las distintas componentes de la cadena analógica de detección. Para ello se emplearon los prototipos de las placas de la electrónica digital desarrolladas inicialmente para el proyecto MARE (Cadena A203-A206 y A225F-A275FC+BLR1 sin fuentes dc), distintos generadores de pulsos para simular la detección de partículas, fuentes radioactivas, y analizadores multicanales comerciales para la electrónica digital. Finalmente se armó el prototipo de la placa de vuelo diseñada para la electrónica analógica del MARE y se comprobó y optimizó su funcionamiento. En este capítulo se describen las tareas relacionadas con estos ensayos.

3.1 ARMADO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE LA PLACA ANALÓGICA DE VUELO

Se implementó el diseño original de la placa analógica de vuelo y se la montó en una caja de pruebas (ver figura 3.1) donde se incluyeron elementos pasivos (capacitores, resistores, diodos), conectores BNC, y cableado para entradas de polarización del detector (HV) y señal de entrada y salida de pulsos. También se montaron los reguladores de tensión para la alimentación de los pre-amplificadores (A225F +12V), los amplificadores (A275FC $\pm 7V$) y los restauradores de línea de base (BLR1 $\pm 7V$) (La etapa de fuentes de alimentación no estaba incluida en la placa guía de la figura 2.18 - cadena analógica simple). Estos trabajos se hicieron con la colaboración del Ing. E. Sauro.

En las primeras pruebas de funcionamiento se detectó un ruido muy importante a la salida del amplificador, del orden de 32 kHz con una amplitud de ~ 7 V. Se analizó minuciosamente el diagrama esquemático del circuito para solucionar el problema, haciendo un seguimiento por etapas, simulando con el

software Isis Profesional v7.10, y estudiando en detalle el funcionamiento de circuitos que incluyen los chips de la empresa AMPTEK [50-51-52], además de interactuar con el Ingeniero E. Sauro [27] encargado del diseño e implementación de la placa original.

Lo anterior tuvo como resultado final, la inclusión de filtros RC en las fuentes de tensión dc, el cambio de resistores para modificar la ganancia en la etapa de amplificación, la inclusión de un capacitor a la salida del amplificador para filtrar oscilaciones mayores a $\sim 3,2$ Mhz, y la inclusión de un capacitor a la entrada del pre-amplificador para estabilizar la señal de salida y reducir oscilaciones de alta frecuencia en el pulso conformado a la salida del pre amplificador. (Ver Figura 2.17)

Luego de resolver los problemas de ruido se utilizó finalmente el prototipo de la cadena analógica de vuelo con dos cadenas de detección para su respectiva caracterización, obteniendo una conformación de pulsos y un nivel de ruido acorde con los parámetros de funcionamiento óptimos sugeridos por el fabricante AMPTEK. [50-51-52] (Ver Figura 3.2a)

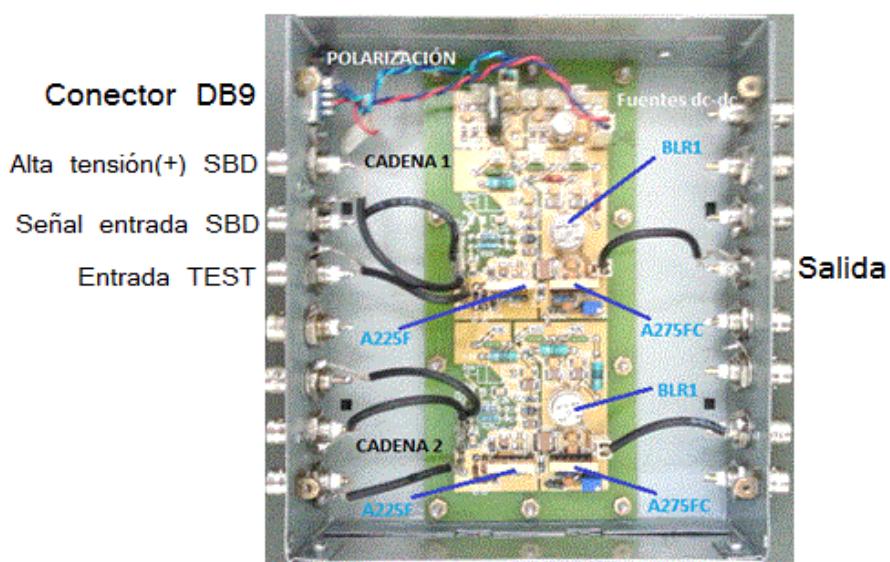
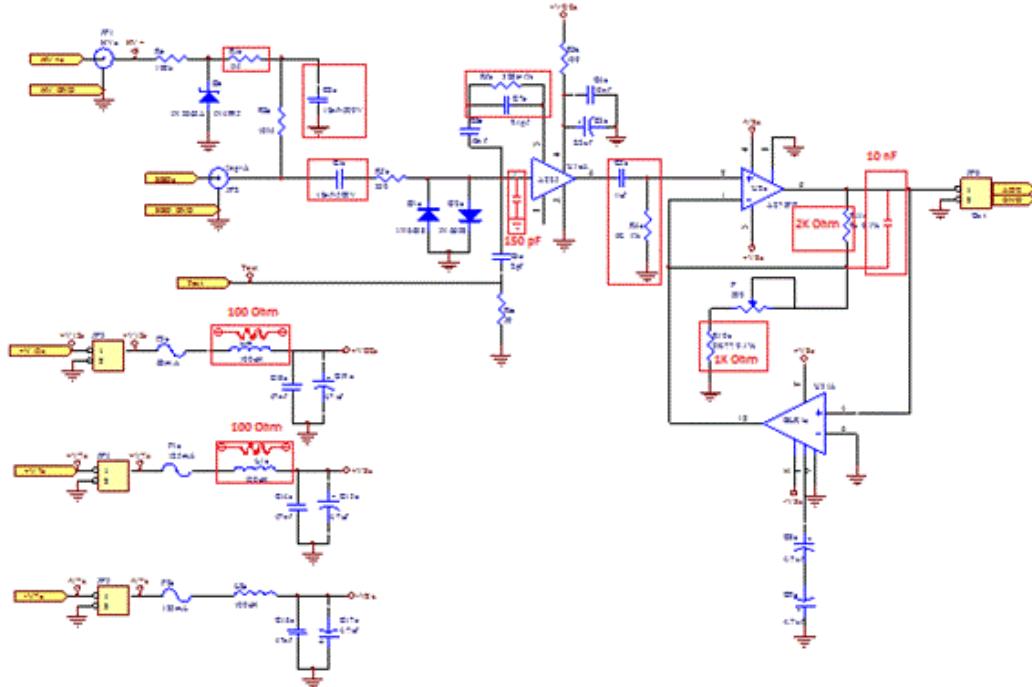


Figura 3.1 Circuito esquemático final que incluye modificaciones, y caja de pruebas en la cual se identifican señales de entrada y salida.

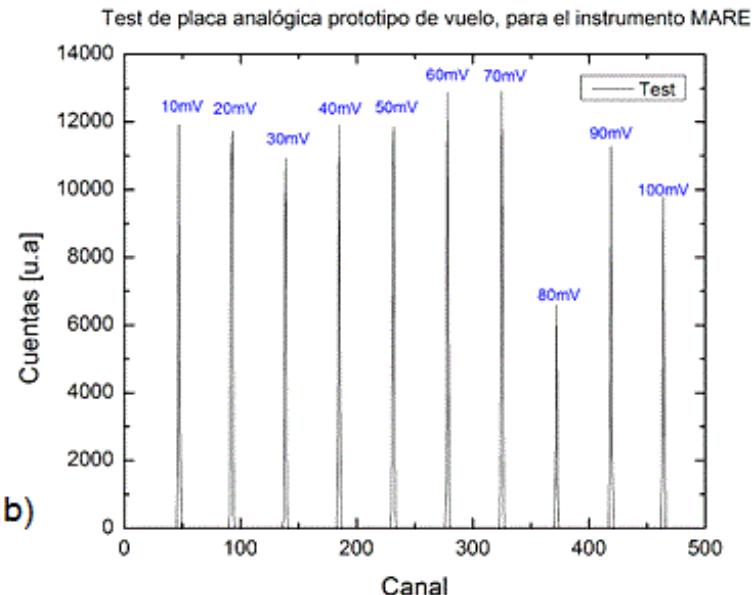
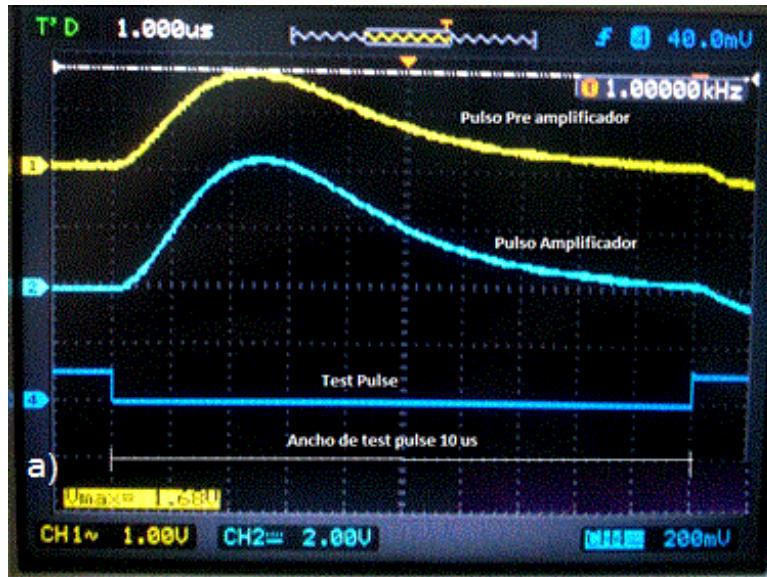


Figura 3.2 - a) Prueba del prototipo de la placa de vuelo desarrollada para la electrónica analógica: Pulsos de salida del pre amplificador A225F y amplificador A275FC, para un pulso negativo de test con un tiempo de subida de 5 ns y ancho de pulso de 10 μ s (ancho de pulso), con una amplitud de 100mV, b) Espectro de altura de pulsos medido a la salida de la cadena analógica con el analizador multicanal MCA Oxford PCAIII, para pulsos negativos de test con amplitud variable entre 10 y 100 mV, (con un paso de 10mV a la entrada del pre amplificador A225F).

En la Figura 3.2b se observa el histograma en altura de pulsos elaborado por el analizador multicanal (Oxford PCAIII), debido a un *pulso de test negativo* que simula un pulso rápido de carga a la entrada de la cadena analógica. Al variar su amplitud, se simula una mayor o menor amplitud en un pulso rápido de carga, proporcional a una mayor o menor energía depositada en un detector (ver sección siguiente).

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA LINEAL DE LA CADENA ANALÓGICA, Y DEL MULTICANAL ORTEC 926.

Antes de proceder a la verificación del funcionamiento de la cadena de detección se caracterizó la respuesta del multicanal ORTEC 926. Para ello se emplearon las configuraciones mostradas en la Figura 3.3.

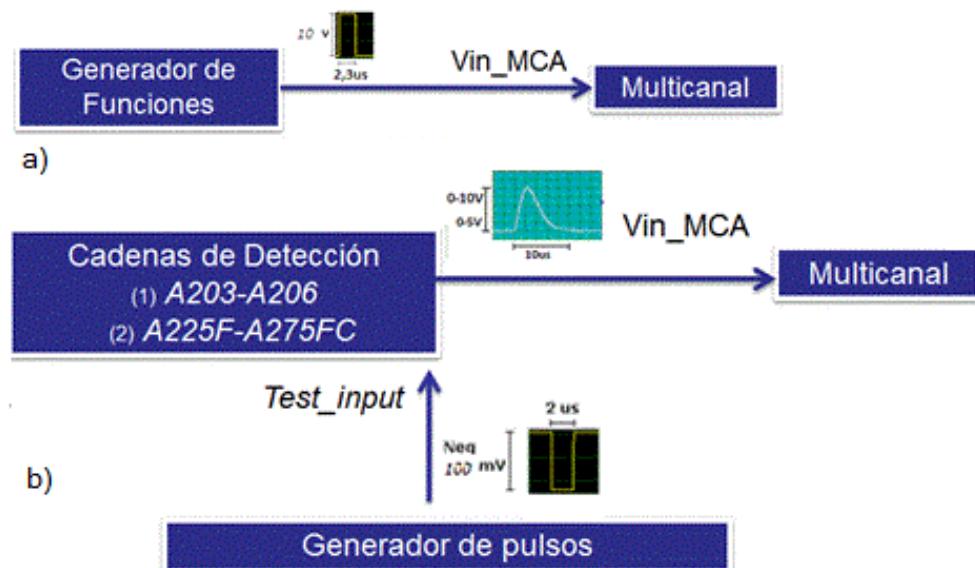


Figura 3.3 - Esquema de conexión del multicanal (a) al generador de pulsos y (b) a las placas analógicas excitadas con pulsos de prueba provistos por el generador de pulsos.

Para el caso del multicanal ORTEC 926 se estudió la respuesta del análisis de la altura de pulso con el ancho temporal del pulso de entrada. Para ello se usaron pulsos cuadrados positivos provenientes del generador de funciones con una frecuencia de 1 kHz y amplitud fija de 1 V. El resultado de cómo cambia la altura de pulso detectada por el multicanal en función del ancho temporal del pulso de entrada se muestra en la Figura 3.4; donde se observa que la lectura resulta constante para pulsos con una duración mínima de 2,3 μ s (la lectura del MCA se estabiliza en el canal 92).

Se repitió el procedimiento ingresando pulsos negativos provenientes del generador de funciones por el "input test" de las cadenas analógicas (1) A203+A206 y (2) A225F+A275FC+BLR1 (Modelo de vuelo), con una amplitud fija de 50 mV y ancho variable; observando que la estabilización de las lecturas en los canales 384 (cadena 1) y 230 (cadena 2) del MCA sucede

para anchos de pulso $T_{width1} \geq 2,4 \mu\text{s}$ y $T_{width2} \geq 20 \mu\text{s}$ respectivamente (Figura 3.4). La diferencia en el valor de canal en cada cadena se debe a que durante el experimento, si bien la altura del pulso a la entrada de los dos pre-amplificadores es la misma, la ganancia en la etapa de amplificación es mayor para la cadena A203+A206, en la cual se obtiene un pulso de salida de 2,88 V, respecto a la cadena A225F+A275FC+BLR1 de 1,78 V.

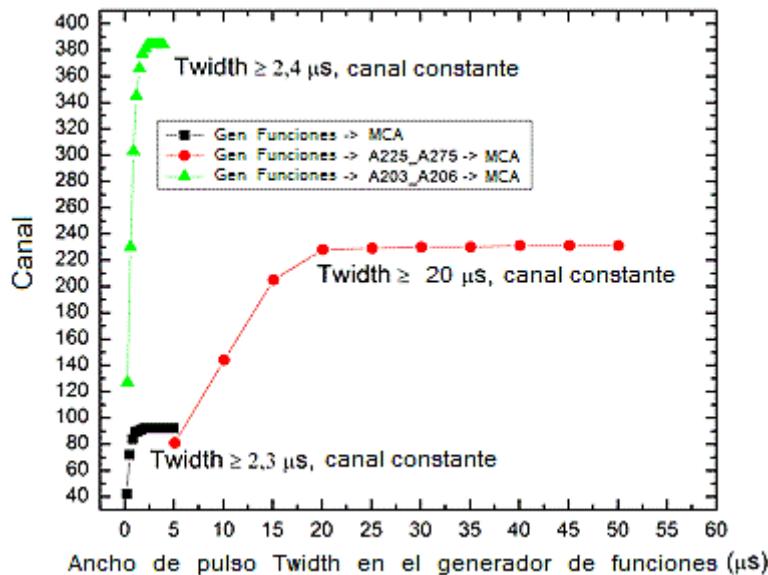


Figura 3.4 - Amplitud del pulso detectado por el analizador multicanal ORTEC 926 en función de la duración del pulso de entrada conectado al multicanal, y a las cadenas A203+A206 y A225F+A275FC+BLR1.

Después de definir la duración mínima de los pulsos necesarios para la verificación de las distintas componentes, se verificó que la respuesta del multicanal, y de las cadenas analógicas fuera lineal. En la Figura 3.5 se muestran los resultados obtenidos de la altura leída por el MCA para las configuraciones detalladas en la Figura 3.3 al variar la altura del pulso de entrada (manteniendo fijo ancho temporal y frecuencia). Se observa que la lectura del analizador multicanal MCA (canales entre 1 - 1024) tiene una respuesta lineal para valores de tensión de entrada entre 0 y 10 V. Para la cadena analógica A203+A206 la ganancia en la etapa de amplificación permite obtener pulsos de salida de amplitud máxima de hasta 10 V; mientras que la A225F-A275FC+BLR1 está diseñada para dar pulsos de salida con una amplitud máxima de 5 V, por eso los rangos de variación en la lectura del MCA es diferente. Haciendo una ampliación en la zona de baja amplitud de

entrada se observa el valor de tensión umbral (66mV) seleccionado a partir del cual el MCA comienza a registrar los pulsos de entrada y a ubicarlos de manera proporcional en sus respectivos canales.

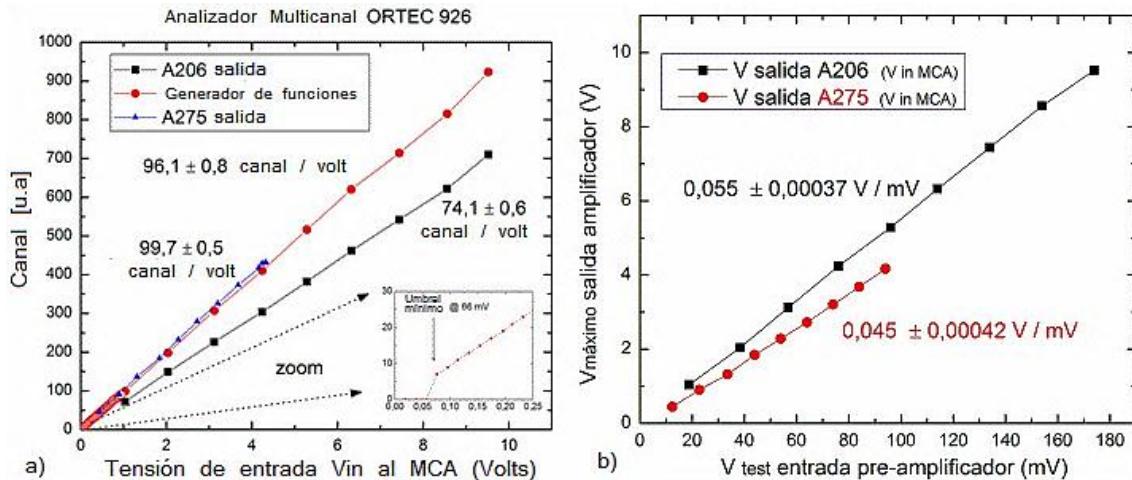


Figura 3.5 - a) Altura de pulso medida por el multicanal ORTEC 926 en función de la amplitud del pulso de entrada al multicanal, empleando generador de funciones, cadena A203+A206 y A225F+A275FC+BLR1, b) Linealidad de las cadenas analógicas de detección.

Se puede ver entonces que en todos los casos la respuesta es lineal, garantizando de esta forma que las mediciones en energías hechas por los detectores con esta electrónica analógica mantiene la linealidad con la carga depositada en el detector. Estas mismas pruebas se realizaron cuando se empleó el Multicanal Oxford PCA III dando resultados equivalentes. (ver por ejemplo Figura 3.2).

3.3 APILAMIENTO (PILE - UP)

Cuando el flujo de partículas es muy alto, pueden arribar al detector más de una en forma simultánea, si esto sucede, el sistema lo interpreta como una sola partícula con energía igual a la suma de las energías cinéticas de las partículas incidentes. Esto hace, por ejemplo, que en el analizador multicanal se observen picos ubicados al doble de energía (arriba de dos eventos simultáneos), o al triple de energía (tres eventos simultáneos), respecto al valor de energía cinética real. Este efecto se denomina apilamiento de picos o *Pile-up*.

up, y cómo afecta al espectro de energía medido, depende de las características propias del detector, de la electrónica de conformación y amplificación de los pulsos, y ocurre en mayor proporción, cuanto mayor es la frecuencia de arriba de la radiación ionizante al detector. En las siguientes secciones presentamos los resultados de la caracterización de dicho efecto en las distintas propuestas para la electrónica analógica del MARE.

3.3.1 RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA CADENA A203+A206 (SIN BLR)

Para estudiar el efecto del apilamiento se empleó el arreglo experimental de la Figura 3.6. Para ello se conectó a la electrónica analógica un detector de barrera de superficie que mida partículas alfas provenientes de una fuente de ^{241}Am junto con los pulsos provenientes de un generador de pulsos aleatorios (Noise Pulser 1407R de Camberra) con variación en frecuencia. La idea no es solo evaluar cómo se modifica el espectro de energía para un pulso de entrada que varía su frecuencia, sino cómo puede afectar éste a otras regiones del espectro. Por ejemplo, si los pulsos aleatorios tiene una altura pequeña respecto de la energía depositada por las partículas alfa, se puede simular las variaciones espectrales en situación de *flares* solares cuando aumenta enormemente la contribución de electrones de más bajas energías sobre partículas de menor fluencia pero más altas energías como protones o alfas.

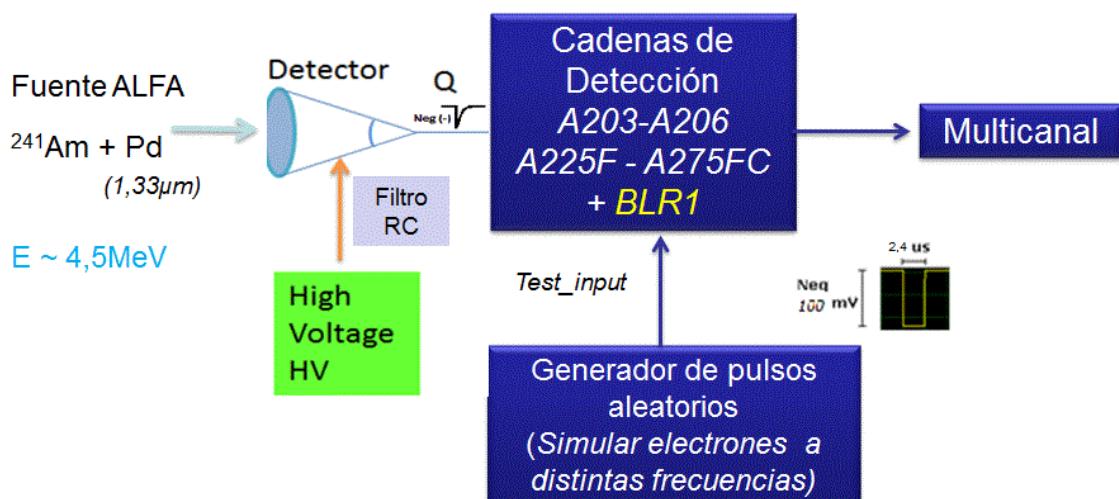


Figura 3.6 Montaje experimental para el estudio del apilamiento (Pile-up).

Para estas pruebas se utilizó como fuente emisora de alfas una fuente de ^{241}Am extraída de un detector de humo que tiene una actividad de aproximadamente 4000 partículas/s. Como ésta tiene un recubrimiento de paladio Pd de $\approx 1,33 \mu\text{m}$ de espesor, la energía final de la fuente es de aproximadamente 4,5 MeV en lugar de 5,4857 MeV. El detector que se utilizó es un Ultra de 100 μm de espesor de la empresa ORTEC (CU-014-50-100) polarizado con una tensión HV = 60 V. El detector junto con la fuente de alfas se introdujo en una cámara de vacío ($P \sim 10^{-3}$ Torr) para evitar el frenamiento de las partículas en el aire. La electrónica se mantuvo fuera de la cámara.

Simultáneamente se ingresaron pulsos rápidos cuadrados y negativos de ancho fijo $T = 2,4 \mu\text{s}$ con alturas entre 0-100 mV provenientes del generador de pulsos por el "input test" de la cadena analógica A203+A206. Estas condiciones simula el arribo de electrones de baja energía ($E < 0,55 \text{ MeV}$) al detector, con frecuencias entre 0 y 242 kHz.

En la Figura 3.7 se muestra una serie de espectros adquiridos con la cadena A203+A206 en función de la frecuencia de los pulsos de prueba. Se observa el pico correspondiente a la fuente alfa (I4) alrededor del canal ~ 813 y un conjuntos de picos identificados como I1, I2, e I3, que corresponde al pulso de prueba (I1), y al apilamiento de dos pulsos (I2) y tres pulsos (I3).

Se observa que para frecuencias mayores de 10 kHz, además de incrementarse la intensidad relativa de los picos de apilamiento, el espectro se corre hacia energías menores, lo que estaría relacionado con un aumento en el nivel dc (Ver Figura 2.15) de la salida del amplificador A206 por la presencia del capacitor $C_{\text{out}2}$, con la consecuente lectura de un valor de pico menor según se comentó en la sección 2.2.3.

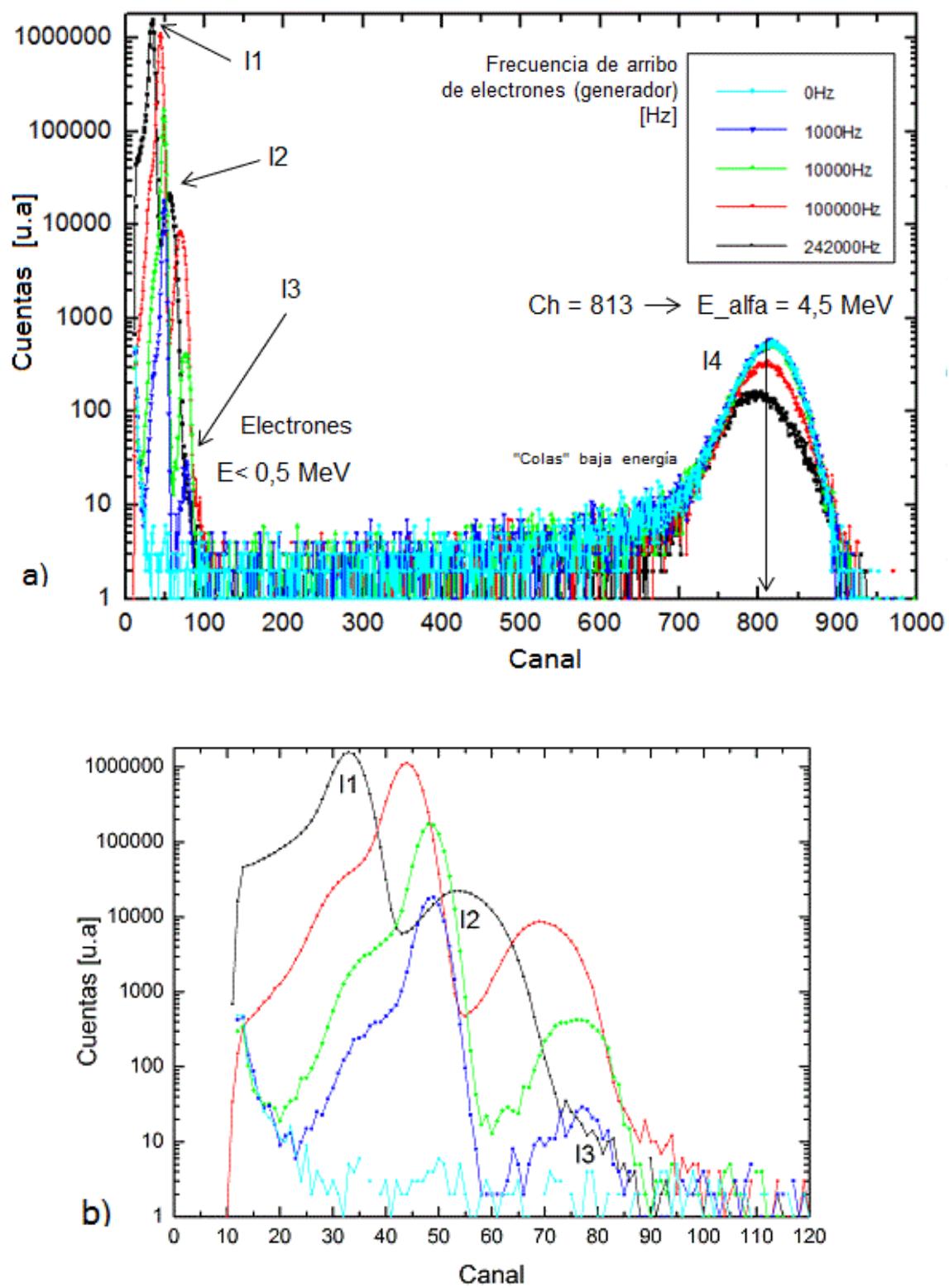


Figura 3.7 - a) Espectro de altura de pulsos adquirido para la cadena analógica A203+A206 (Sin BLR) para diferentes frecuencias de pulsos de prueba. Tiempo real de adquisición: 100s. b) Zona ampliada que muestra el detalle de los pulsos de baja amplitud.

A modo de cuantificar el efecto, en la Figura 3.7 se muestran los valores de las integrales de los cuatro picos (I_1 , I_2 , I_3 e I_4), la contribución relativa computada entre los picos I_1 al I_3 , el porcentaje de pérdida de eventos, y el corrimiento de canales del espectro en función de la frecuencia del pulso de prueba. Se puede observar que para el conteo nominal máximo del MARE (50 kHz) la contribución al apilamiento de dos pulsos es menor al 2%, siendo la contribución al apilamiento de tres picos prácticamente despreciable. Por otro lado el porcentaje de pérdidas de eventos computados como la cantidad de cuentas que se miden en un pico específico respecto del número de pulsos incidentes al sistema (frecuencia de pulsos de entrada) puede ser entre el 10 y el 15% para 50 kHz. La pérdida de conteo viene del hecho de que al producirse el apilamiento de pulsos, la electrónica de detección no es capaz de discriminar varios pulsos simultáneos y los registra como uno solo. En el panel (d) se observa el corrimiento en canales del pico I_1 . Para una frecuencia de 50 kHz dicho corrimiento es de alrededor de 2 canales, lo que representa según la calibración del sistema, tan solo 14 keV. Para una frecuencia de 242 kHz el corrimiento puede ser importante, llegando a 90 keV.

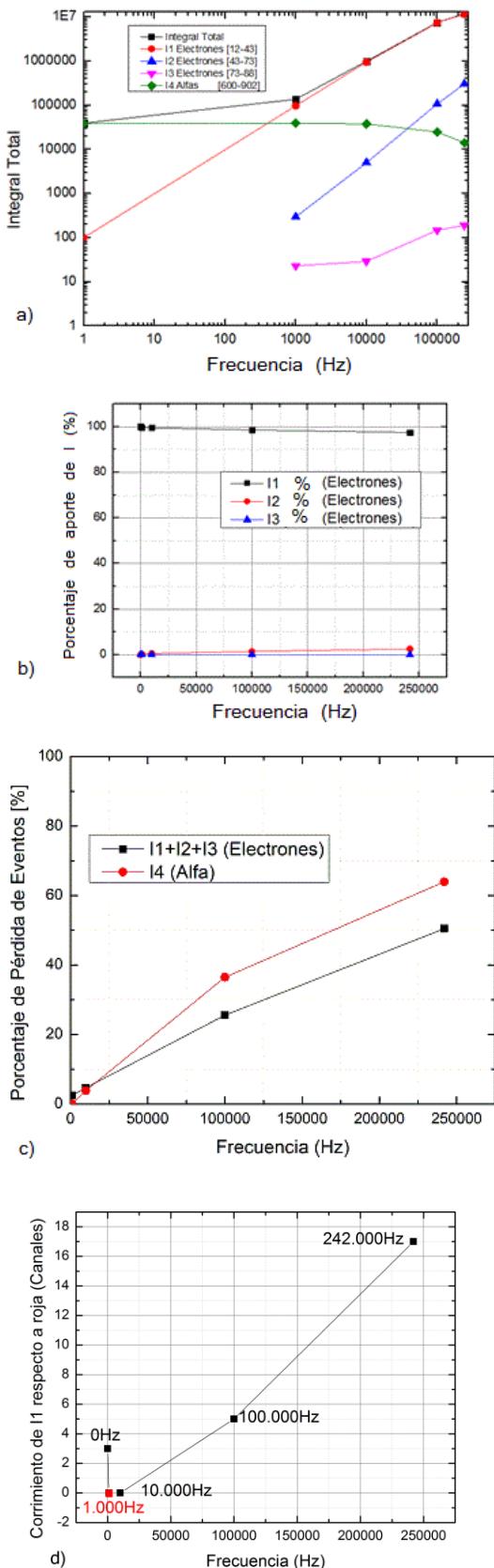


Figura 3.8 - Estudio de respuesta en frecuencia para la cadena A203+A206 sin BLR. (a) Integral de los picos I1 a I4 de la Figura 3.7. (b) Porcentaje de apilamiento respecto del pico I1 (Intensidades relativas a la del pico I1). (c) Porcentaje de pérdida de eventos relativo a la frecuencia de pulsos de entrada. (d) Corrimiento en canales del pico I1.

3.3.2 RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA CADENA A225F+A275FC+BLR1

Se realizó el mismo procedimiento de la sección anterior, para estudiar la respuesta en frecuencia de la cadena de detección A225F+A275FC+BLR1, con el arreglo experimental de la Figura 3.6 (mismas condiciones HV = 60V, vacío de mecánica, fuente emisora de alfas ^{241}Am + $\text{Pd}_{1,33\mu\text{m}}$, generador de pulsos aleatorios y tiempo de adquisición), pero considerando la cadena analógica ya mencionada. En la Figura 3.9 se muestra una serie de espectros adquiridos con esta nueva cadena en función de la frecuencia de los pulsos de prueba hasta frecuencias del orden de los 240 kHz; y en la Figura 3.10 se muestran los valores de las integrales de los cuatro picos (I_1 , I_2 , I_3 e I_4), la contribución relativa computada entre los picos I_1 al I_3 , el porcentaje de pérdida de eventos, y el corrimiento de canales del espectro en función de la frecuencia del pulso de prueba.

De la zona ampliada de la Figura 3.9 se puede ver claramente que el efecto de corrimiento en energía con la nueva placa analógica es prácticamente despreciables, aún para las más altas frecuencias de ensayo (242 kHz), mucho mayores que las nominales del MARE (hasta 50 kHz). Otra de las diferencias respecto de los espectros presentados en la Figura 3.7 es que en este caso a medida que aumenta la frecuencia los picos para frecuencias mayores de 100 kHz se observan un poco menos definidos, perdiendo un poco de resolución.

En la Figura 3.10 se puede observar que para el conteo nominal máximo del MARE (50 kHz) la contribución al apilamiento de dos pulsos es del orden del 6%, aunque la contribución al apilamiento de tres picos es prácticamente despreciable. Este aparente incremento de la proporción del apilamiento creemos es debido a que integramos menos área en el pico principal I_1 , dado que el pico medido por el multicanal quedó más cerca del umbral de discriminación del multicanal, perdiendo parte del flanco izquierdo (comparar zonas ampliadas de las Figuras 3.7 y 3.9). Recordar que se comentó que para esta cadena la salida total es de 5 V respecto de la anterior que era de 10 V, por lo que un pulso de entrada que daba un pulso a una cierta

tensión, ahora lo da a la mitad. El hecho de que los espectros aparezcan en un rango de canales similares es porque se cambió la ganancia del multicanal para tener los espectros de ambos casos en 1024 canales.

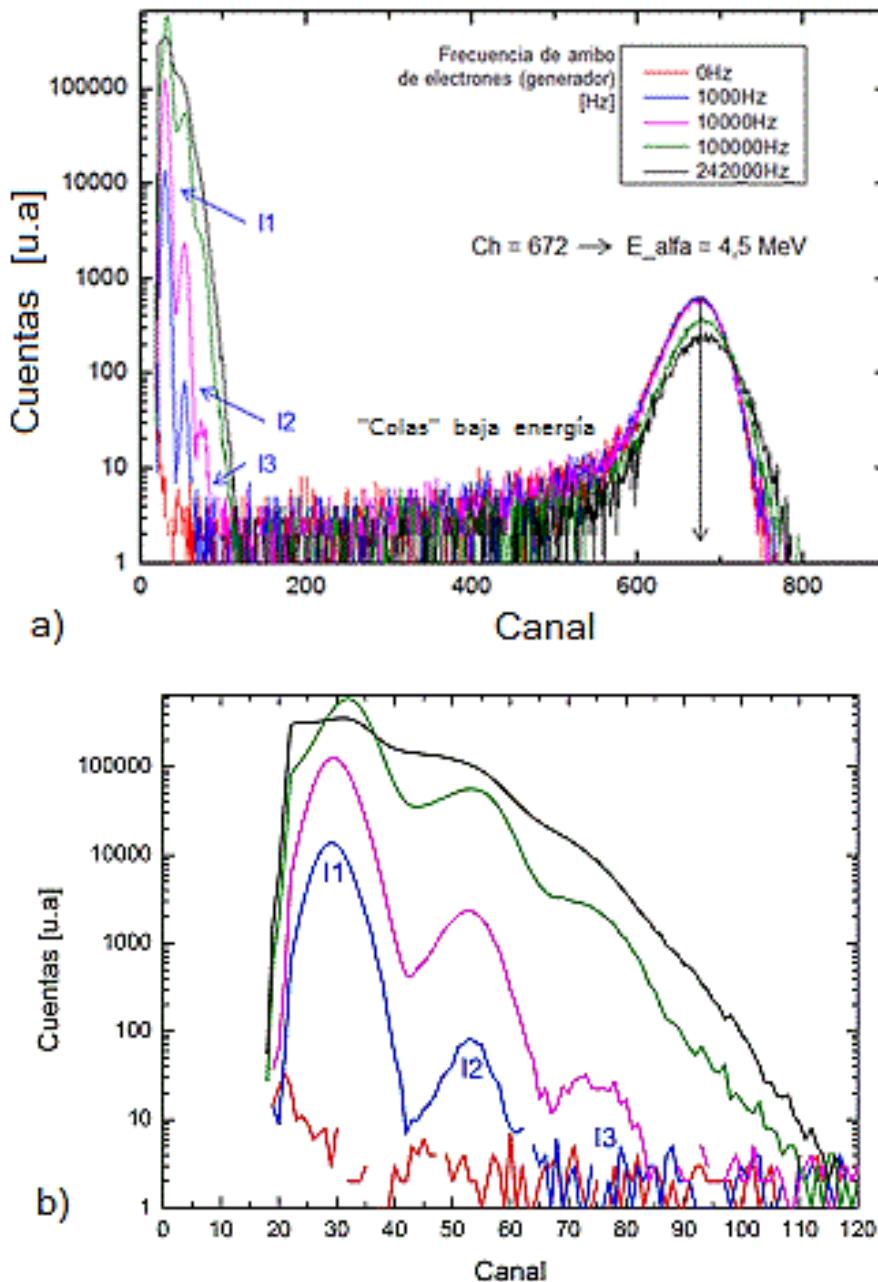


Figura 3.9 - a) Espectro de altura de pulsos adquiridos para la cadena analógica A225F-A275FC+BLR1 en función de la frecuencia de pulsos de prueba. Tiempo real de adquisición: 100s. b) Zona ampliada que muestra el detalle de los pulsos de baja amplitud.

En la Figura 3.10 se puede observar que para el conteo nominal máximo del MARE (50 kHz) la contribución al apilamiento de dos pulsos es del orden del 6%, aunque la contribución al apilamiento de tres picos es prácticamente despreciable. Este aparente incremento de la proporción del apilamiento creemos es debido a que integramos menos área en el pico principal I1, dado que el pico medido por el multicanal quedó más cerca del umbral de discriminación del multicanal, perdiendo parte del flanco izquierdo (comparar zonas ampliadas de las Figuras 3.7 y 3.9). Recordar que se comentó que para esta cadena la salida total es de 5 V respecto de la anterior que era de 10 V, por lo que un pulso de entrada que daba un pulso a una cierta tensión, ahora lo da a la mitad. El hecho de que los espectros aparezcan en un rango de canales similares es porque se cambió la ganancia del multicanal para tener los espectros de ambos casos en 1024 canales.

Al igual que en el caso anterior, el porcentaje de pérdidas de eventos computados como la cantidad de cuentas que se miden en un pico específico respecto del número de pulsos incidentes al sistema (frecuencia de pulsos de entrada) puede ser entre el 10 y el 15% para 50 kHz.

Otro de los puntos importantes que muestra la Figura 3.10 en el panel (d) es que el corrimiento en canales del pico I1 para una frecuencia de 100 kHz es de 1 canal (6 keV), y se mantiene en ese valor hasta las frecuencias más altas estudiadas (242 kHz). Este corrimiento es mucho menor al observado para la cadena A203+A206 sin BLR y con capacitor de salida C_{out2} , por lo cual se concluye que la cadena elegida para la electrónica de vuelo (A225F+A275FC+BLR1) es mejor que la anterior.

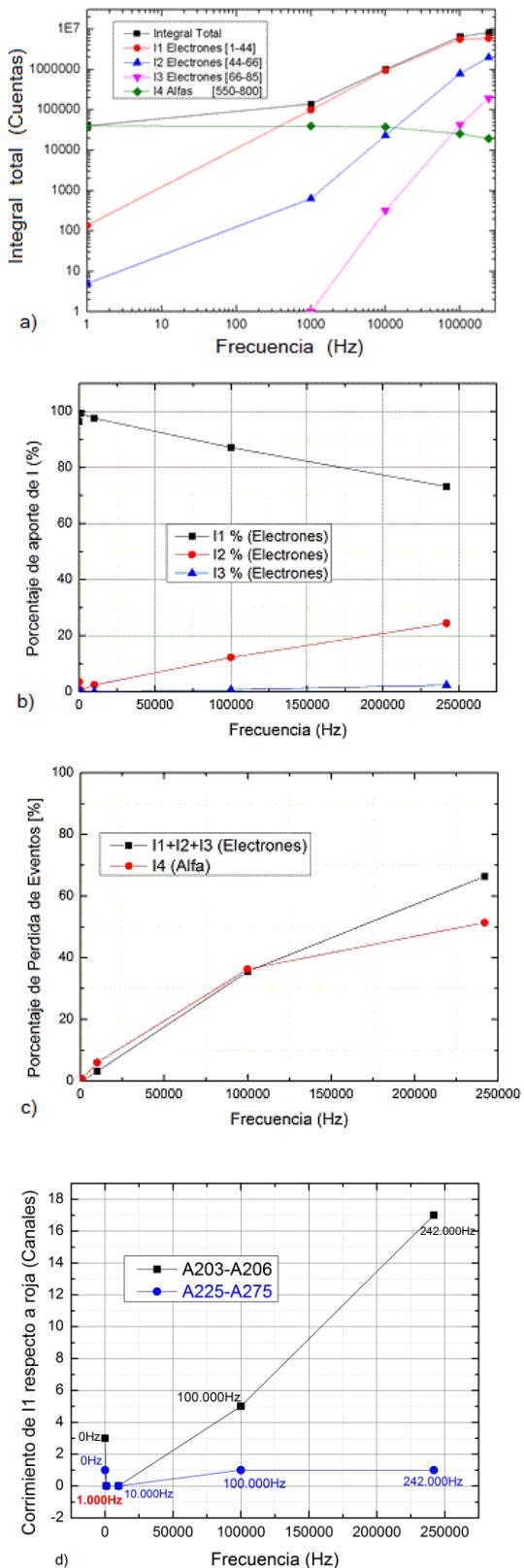


Figura 3.10 - Estudio de respuesta en frecuencia, para la cadena A225F-A275FC+BLR1. (a) Integral de los picos I1 a I4 de la Figura 3.9. (b) Porcentaje de apilamiento respecto del pico I1 (Intensidades relativas a la del pico I1). (c) Porcentaje de pérdida de eventos relativo a la frecuencia de pulsos de entrada. (d) Corrimiento en canales del pico I1.

3.4 PRUEBAS TÉRMICAS DE LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA

Como se comentó en la sección 2.4, el monitor MARE cambia su temperatura en función del tiempo (Figura 2.24) ya que éste se encuentra expuesto de distinta manera al sol cuando rota con la tierra. Los valores estimados por el grupo G.E.M.A. [36], teniendo en cuenta los datos provistos por el ACTA, varían en forma cíclica entre -10 y 40 °C. Como no se dispone de una cámara de termo vacío suficientemente grande, y que regule este rango de temperatura, se decidió calentar en aire la placa analógica hasta una temperatura de 60°C estando dentro del rango de seguridad requerido para el proyecto, además porque es en altas temperatura, donde se espera que se produzca más ruido.

Para realizar las pruebas térmicas al prototipo de la placa analógica de vuelo se montó el sistema experimental que se muestra en la Figura 3.11. Para el calentamiento se empleó una plancha calefactora en contacto térmico con la caja metálica donde se monta la placa, que fue envuelta en papel de aluminio y aislada térmicamente por una caja de cartón. La temperatura del sistema se registró sobre tres puntos de la electrónica: (1) Sobre la superficie del restaurador de línea de base BLR1, (2) sobre la superficie de superior de la caja que contiene la electrónica analógica y (3) sobre la superficie del preamplificador A225F. La electrónica fue conectada con el detector SBD tipo A de 2000 μm polarizado a HV = 140V. Como fuente de partículas alfas incidentes se usó la fuente de calibración que tiene los siguientes elementos emisores de alfas: ^{239}Pu ($E = 5,1534 \text{ MeV}$), ^{241}Am ($E = 5,4857 \text{ MeV}$) y ^{244}Cm ($E = 5,8050 \text{ MeV}$). La fuente y el detector se montó en la cámara de vacío ($\sim 10^{-3} \text{ Torr}$).

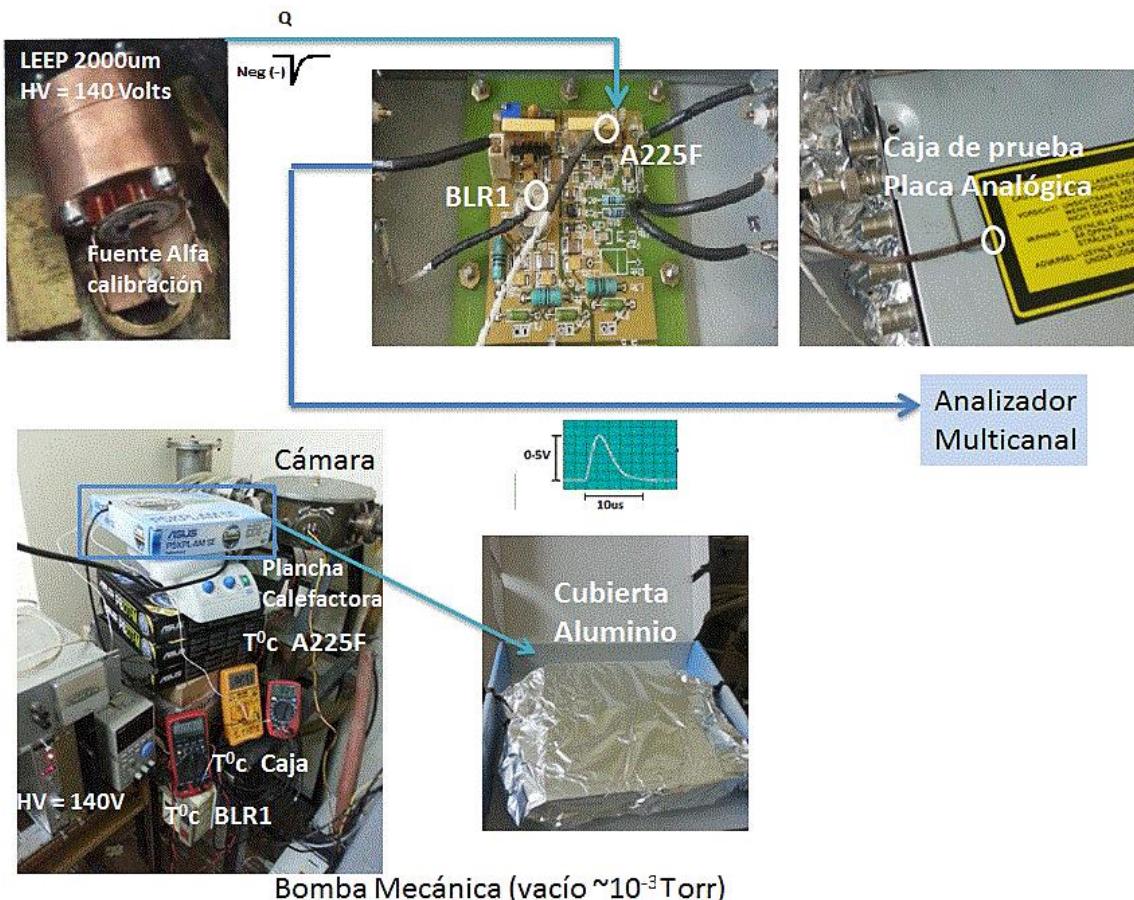


Figura 3.11 Montaje experimental para las pruebas térmicas del prototipo de la placa analógica de vuelo.

En la primera prueba se calentó la caja de prueba empleando la plancha calefactora, variando la temperatura del BLR1 entre 25 y 64 °C. Durante el calentamiento se tomaron los espectros de energía con tiempos vivos de adquisición de 60 s cada uno, hasta llegar a los 60 °C, finalmente se tomó otro con mayor estadística (302 s) estando el BLR1 en 64 °C. La duración del experimento desde el comienzo de la medición hasta llegar a los 64 °C fue de 1 hora y 10 minutos aproximadamente, momento en el cual se apagó la plancha (68 °C) y se tomaron lecturas de temperatura y espectros de energía hasta bajar a los 31 °C en el BLR1. El tiempo transcurrido durante la bajada fue de aproximadamente 1 hora y 50 minutos, y los espectros se adquirieron como en el caso anterior con tiempos vivos de 60s hasta alcanzar los 31 °C, donde se adquirió otro durante 302 s. Los valores de temperatura máximos a los que fueron sometidos los chips de la empresa AMPTEK están al ~50% de su valor máximo recomendado por el fabricante [50-51-52-56-57], es decir se está dentro del rango de temperatura permitida.

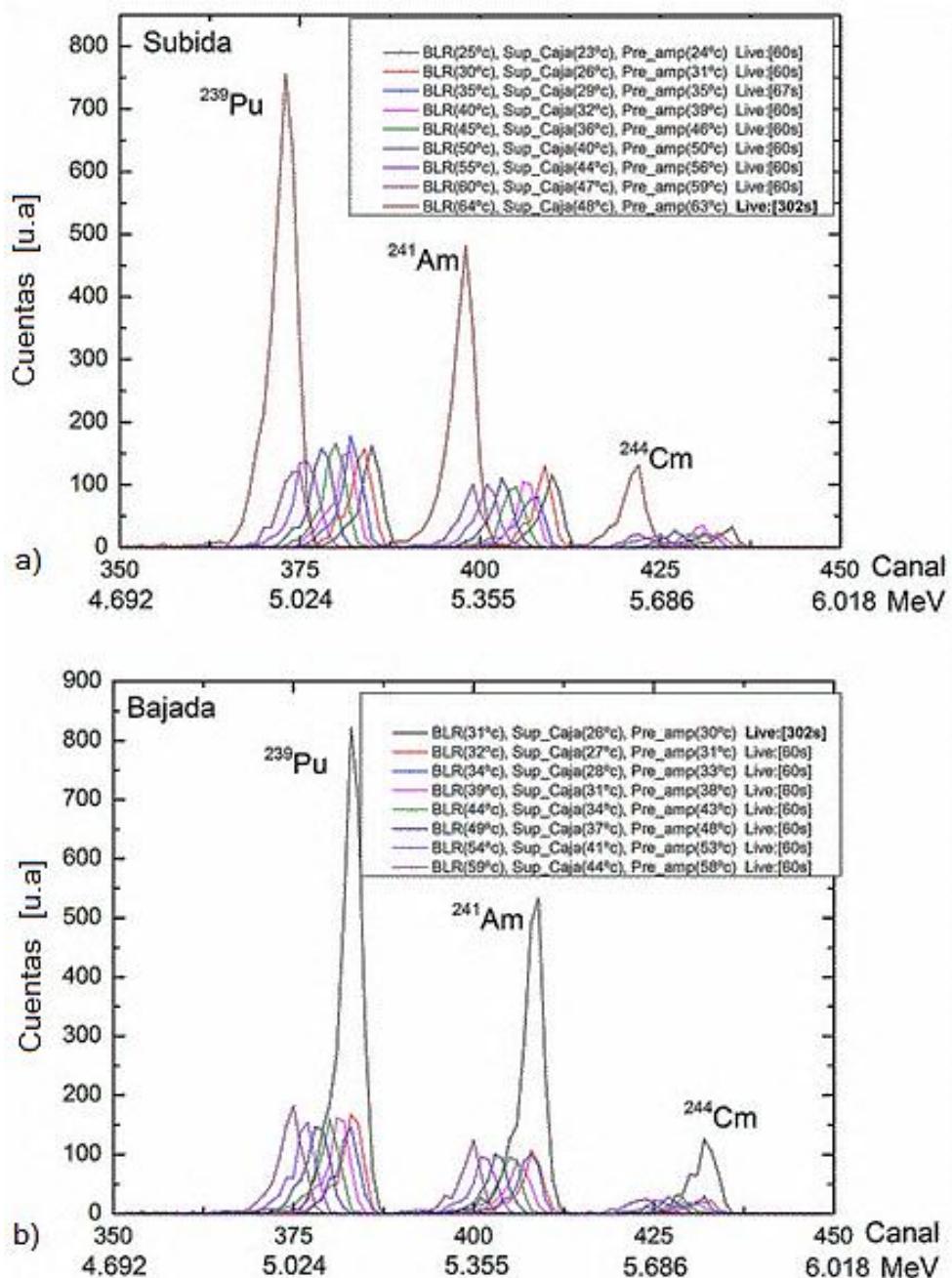


Figura 3.12 Primera prueba térmica: a) cuando aumenta la temperatura en los chips y b) cuando disminuye la temperatura en los chips.

En la Figura 3.12 se muestran los espectros en energía adquiridos durante el primer ciclado térmico. Se observa como al aumentar la temperatura en los tres puntos de medición hasta un máximo de 64 °C en el BLR1 (48 °C en la superficie de la caja y 63 °C en el pre-amplificador), los picos asociados a los alfas se desplazan en energía del orden del 3% para la variación máxima de temperatura. Cuando se aumentó la temperatura de 25 a 68 °C el pico correspondiente al alfa del ^{239}Pu que inicialmente está en 5,15 MeV se corrió

hasta 4,99 MeV, preservando su resolución en energía $\Delta E \approx 0,053$ MeV. Al disminuir la temperatura a 31 °C, los picos volvieron a sus posiciones iniciales. El mismo efecto ocurre con los picos de ^{241}Am y ^{244}Cm . En la Figura 3.13 se observa que dicho corrimiento resulta lineal con la temperatura.

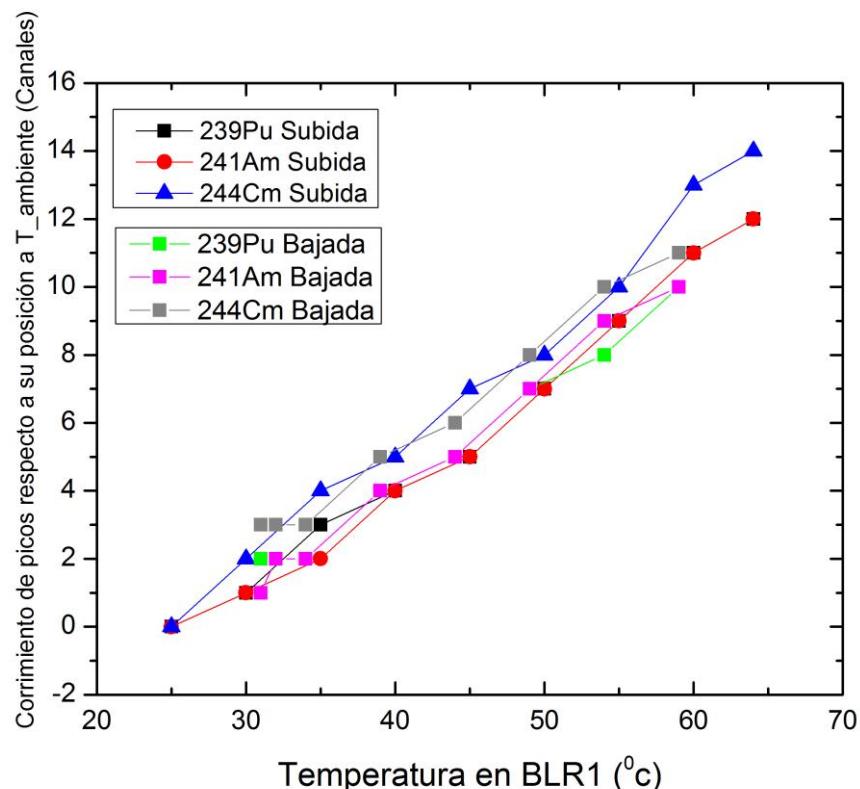


Figura 3.13 a) Corrimiento de picos respecto a su posición a 25°C en función de la temperatura medida en el BLR1.

Se observa que el desplazamiento de los picos defiere entre 2 y 3 canales al comparar las curvas de subida y bajada, evidenciando una tendencia lineal tanto en ascenso, como en descenso de la temperatura en el BLR1 (Temperatura de referencia).

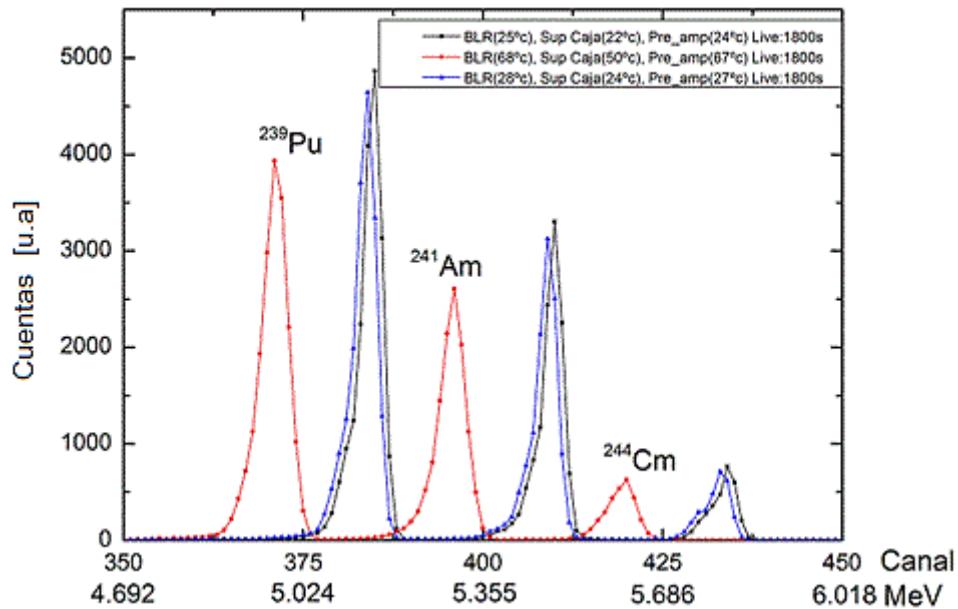


Figura 3.14 - Segunda prueba térmica de la placa analógica con tiempos de adquisición de 1800 s (30 minutos), para 25 °C, 68 °C y luego de descender a 28 °C.

Se realizó una segunda prueba de ciclado térmico con tiempos de adquisición mayores a los de la primera (1800s), para temperaturas en el BLR1 de 25 °C, 68 °C y luego de descender a 28 °C. Para cada una de esas temperaturas se esperó suficiente tiempo como para que el sistema se estabilice (al menos ~20 minutos entre las pruebas). En la Figura 3.14 se presentan los tres espectros adquiridos en esas condiciones, observándose el mismo efecto que en el primer ciclado: la energía del espectro se corre un 3% hacia valores menores de su energía inicial al aumentar la temperatura, lo que indica que la ganancia total de la cadena disminuye en ese porcentaje su ganancia. Hasta el momento de escribir esta tesis no conocemos si existe algún componente específico que sea el responsable de dicha variación.

En la Figura 3.15 se muestra la integral de cada uno de los picos provenientes de la fuente alfa de calibración, para los valores extremos de temperaturas analizadas. Se puede observar que si bien existe una disminución en el máximo total de los picos (Figura 3.14), los valores de la integral no cambian con la temperatura, es decir que no se afectó el conteo total durante la media hora de adquisición que duró cada espectro; indicando que no existe pérdida de conteo al variar la temperatura como ocurría en el caso del apilamiento.

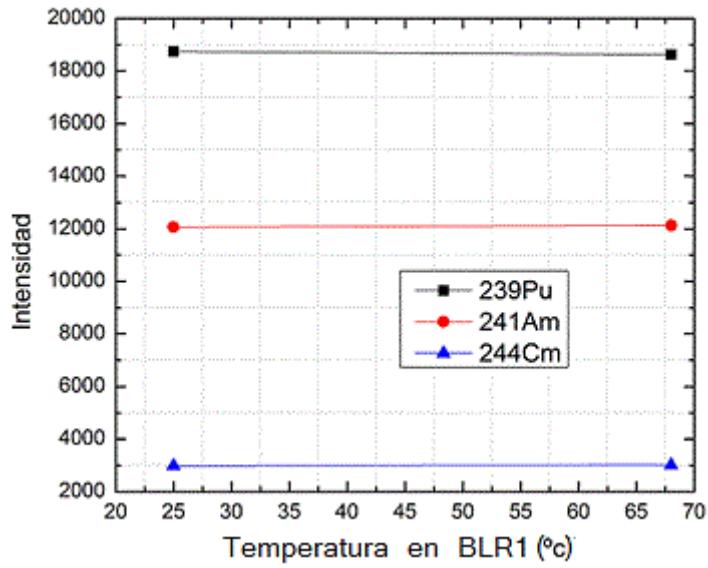


Figura 3.15 Intensidad de los picos de la Figura 3.14 para los valores extremos medidos en el BLR1.

En resumen, los ciclados térmicos del prototipo de la placa analógica de vuelo nos indican que al aumentar su temperatura, ni la resolución en energía, ni la intensidad total de los mismos cambian; solo se observa una disminución lineal de la ganancia, con una diferencia total del 3% si se pasa de 25 a 68°C.

CAPÍTULO 4

4 CARACTERIZACIÓN DE LOS DETECTORES

Después de estudiar y caracterizar el desempeño de la electrónica analógica del MARE, se continuó con el estudio de los detectores y la caracterización de las distintas componentes, como ser filtros de entrada, y los detectores SBD de distintos espesores. Para ello se emplearon los prototipos de desarrollo que se armaron usando la geometría de los de vuelo, con detectores de barrera de superficie similares en espesor y en los modelos propuestos para los de vuelo, pero con distintas áreas de colección. Para esto empleamos distintas fuentes radioactivas emisoras de partículas alfas (^{239}Pu , ^{241}Am y ^{244}Cm) y partículas β^- (^{99}Tc , ^{36}Cl , ^{90}Sr y ^{90}Y), y adquirimos los espectros de energía correspondientes. En este capítulo describimos las tareas relacionados con estos ensayos.

4.1 MEDICIONES CON FUENTES RADIATIVAS EMISORAS DE β^-

El decaimiento β^- es un tipo de decaimiento radiactivo en el cual se conserva la cantidad total de nucleones, es decir, se producen siempre dentro de la misma isobara. Como producto del decaimiento se emite un electrón y un antineutrino que se reparten la energía E_{\max} disponible en el decaimiento. A diferencia de los espectros de emisión de partículas alfas, la emisión conjunta del electrón y del antineutrino produce que el espectro de energía de los electrones emitidos sea continuo, con una energía máxima dada por E_{\max} , y que la distribución presente un máximo en energías entre 0 y E_{\max} . Los elementos radioactivos que se usaron fueron ^{99}Tc , ^{36}Cl , ^{90}Sr e ^{90}Y , que tienen como energías máximas 0,3, 0,7, 0,6 y 2,3 MeV, respectivamente. La actividad de las fuentes β^- empleadas era muy baja (^{90}Sr - ^{90}Y (0,0196 μCi), ^{36}Cl (0,0222 μCi) y ^{99}Tc (0,049 μCi)), por lo que las pruebas demandaron varios meses, teniendo en cuenta que para lograr una estadística razonable, cada espectro debió ser adquirido durante varios días y a veces hasta una semana. Estos experimentos se realizaron en la cámara de vacío que provee una buena aislación eléctrica y a la luz ambiente, pero no se realizó vacío puesto

que las fuentes radioactivas usadas no lo permitían. Para evitar la pérdida de datos por cortes de energía eléctrica y ruidos inesperados, se procedió a programar el multicanal Oxford PCAIII para guardar los espectros, típicamente cada media hora de medición.

4.1.1 MEDICIONES CON DETECTOR TIPO A DE 2000 μm

El primero de los estudios se realizó con el prototipo del detector LEEP para detección de electrones y protones de baja energía, el cual emplea un detector de barrera de superficie de la empresa ORTEC AA-018-100-2000 tipo A de 2000 μm de espesor, completamente depletado, es decir con todo su espesor sensible a la radiación.

Antes de comenzar a medir los espectros de energía con las fuentes radioactivas de partículas β^- , se levantó la curva de ganancias vs tensión de polarización para determinar el potencial de trabajo (donde comienza la saturación), y se calibró en energía el sistema compuesto con el detector más el prototipo de la cadena analógica A225F+A275FC+BLR1 de vuelo implementada en la tesis. Se usó para esto último, la fuente de calibración alfa empleada en las pruebas térmicas (sección 3.4) con el detector y las fuente de alfas en vacío de mecánica ($\sim 10^{-3}$ Torr). En la Figura 4.1 se muestran dichos resultados, de los cuales se deduce que la tensión de polarización adecuada es de 140 V, y con esa tensión se procedió posteriormente a calibrar en energías el sistema, es decir, relacionar la lectura en canales del multicanal con la energía depositada en el SBD.

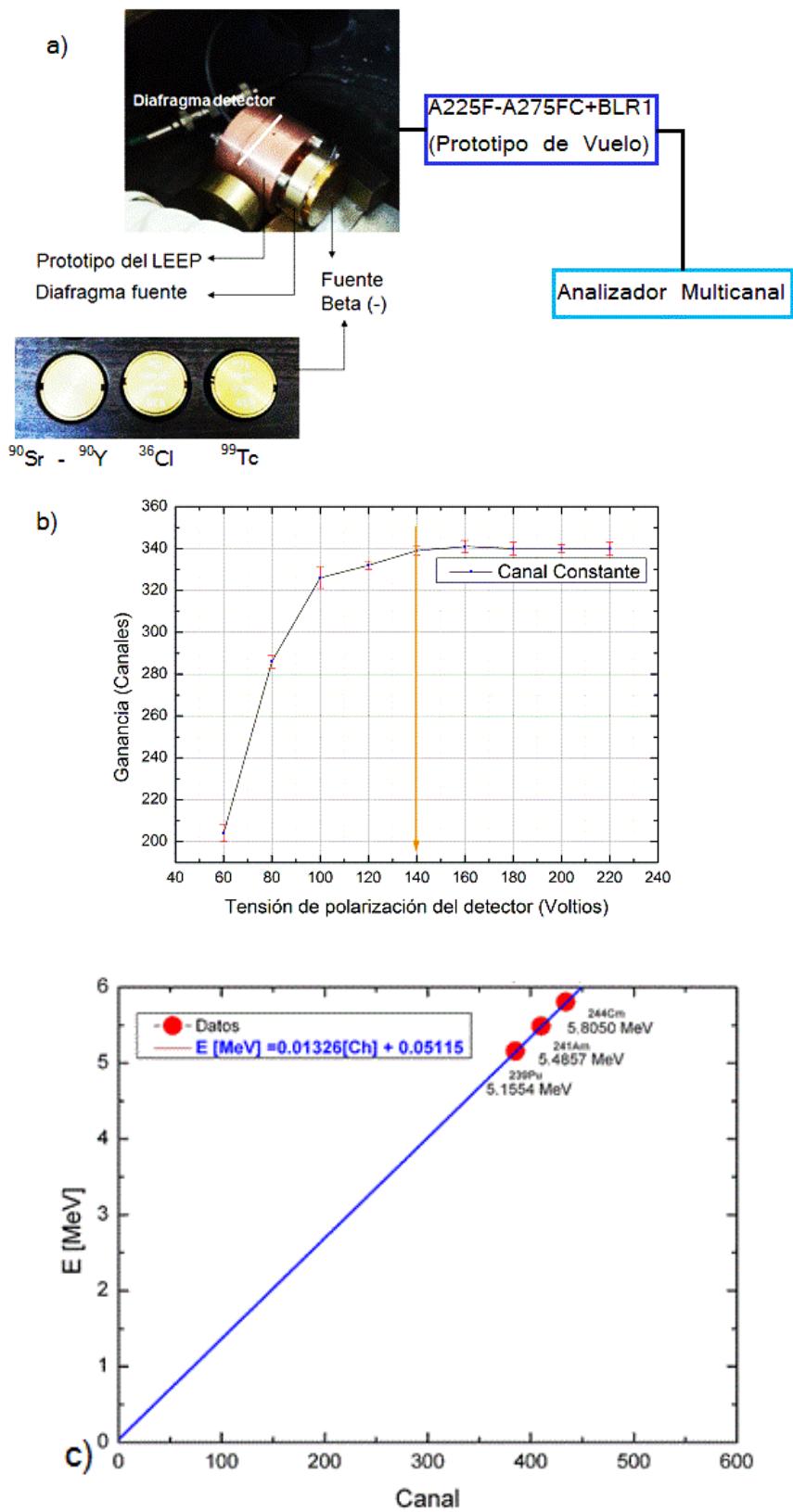


Figura 4.1 a) Imagen del montaje experimental del prototipo del LEEP sin su colimador de entrada de aluminio junto a la fuente de β^- , b) curva de Ganancia vs tensión de polarización (HV) del SBD AA-018-100-2000, y c) curva de calibración en energía del sistema, polarizando el SBD con HV = 140 V. Para esto se empleó la fuente de calibración alfa con las siguientes energías: 5,1534 MeV (^{239}Pu), 5,4857 MeV (^{241}Am), y 5,8050 MeV (^{244}Cm).

Teniendo en cuenta que los espectros con partículas β^- (electrones energéticos) se deben realizar en aire, se estimó cómo podría afectar el frenamiento en aire teniendo en cuenta que la distancia fuente detector era típicamente de 3,5 cm. Para estas distancias los electrones pierden aproximadamente 0,044 MeV, lo que para los fines prácticos es despreciable para estos ensayos.

En la Figura 4.2 mostramos los resultados obtenidos con la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Lo primero que hay que destacar es que como la actividad de las fuentes de electrones es extremadamente baja, el fondo de ruido propio de la electrónica junto al proveniente del ambiente de radiaciones naturales puede afectar el espectro de energías. Lo primero que mostramos en el panel a) es cómo varía este fondo, presentado en forma logarítmica, con la tensión de polarización del detector. Se observa que éste se va corriendo hacia altas energías a medida que aumenta la tensión de polarización, lo que es razonable ya que la ganancia también aumenta hasta los 140 V (Figura 4.1). La forma del espectro es tal que disminuye monótonamente hacia altas energías, pero llama la atención, que aún sin fuentes radioactivas, se observan picos en la región de las energías de las partículas alfa de calibración (~ 5 MeV). La presencia de estos picos se observó aun sacando el detector fuera de la cámara de vacío, por lo que su presencia indicaría una leve deposición de material radioactivo en el blindaje de cobre a la entrada del detector, o en el detector mismo, midiendo en esa zona un ritmo de conteo menor a 10^{-4} cuentas/s. El nivel de ruido propio de los detectores en la zona de 3-8 MeV es aproximadamente 5 cuentas/(hr.cm³) [61], lo que se traduce en este detector en aproximadamente 2×10^{-4} cuentas/s, que está dentro del rango de lo medido en el experimento. Para tener una idea del ruido total asociado al fondo se integró todo el espectro de energías (0 - 6,8 MeV) adquirido en 192 hs. La tasa de conteo total asociada al fondo resultó ser de 0,16 cuentas/s.

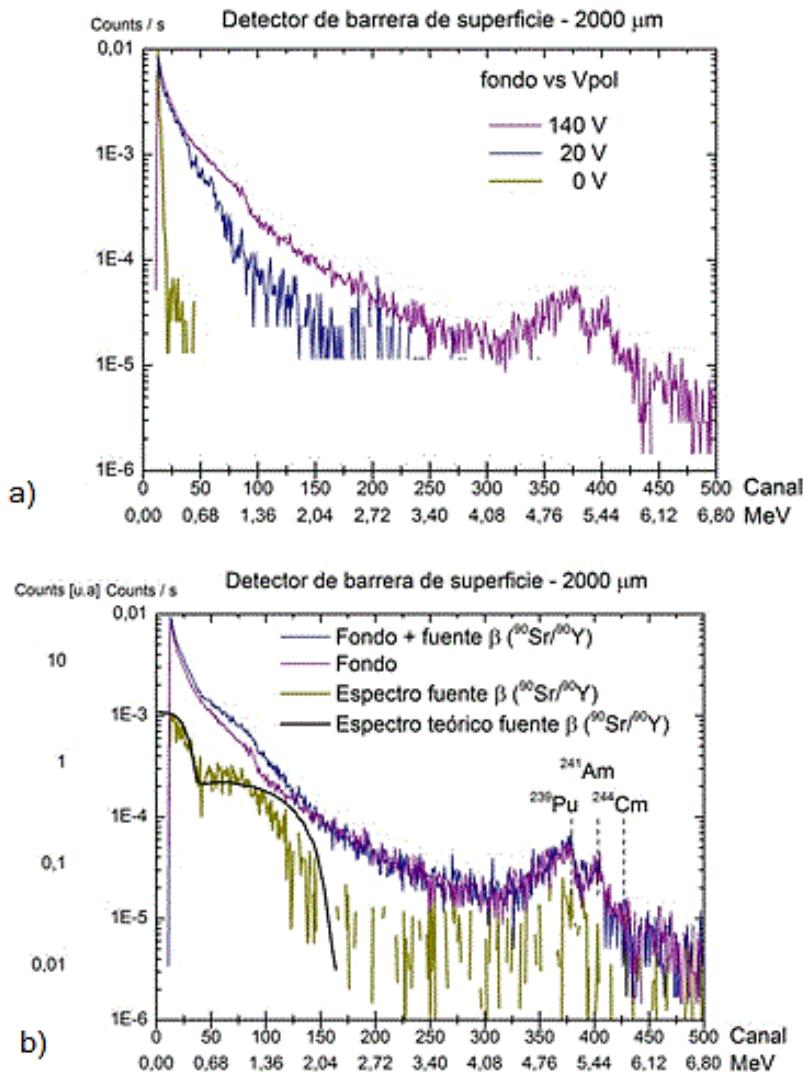


Figura 4.2 a) Fondos adquiridos a distintos valores de polarización del detector (sin fuentes radioactivas), b) Comparación de los espectros adquiridos con fuente β^- ^{90}Sr - ^{90}Y , sin la fuente radiactiva, y la diferencia de dichos espectros para obtener solo la contribución de la fuente. Se muestra además el espectro calculado en la referencia [62],[63] para la fuente de ^{90}Sr - ^{90}Y .

En el panel b) de la Figura 4.2 se muestran los espectros medidos con la fuente de electrones (Fondo + fuente β), solo el fondo (sin fuente radioactiva), y la diferencia entre ambos para obtener solamente el espectro de electrones medido por el LEEP. También se graficó por comparación el espectro calculado para la fuente ^{90}Sr - ^{90}Y obtenido de la referencia [62]. La tasa de contaje del espectro de β^- fue 0,034 cuentas/s.

En la Figura 4.3 se muestran los espectros de energía medidos para las tres fuentes emisoras de β^- , a los cuales se les sustrajeron los fondos

correspondientes obtenidos de la referencias [62],[63]. En la Figura 4.3.a se observa el decaimiento por β^- del núcleo padre ^{90}Sr , que decae a un núcleo hijo ^{90}Y emitiendo electrones con energías entre 0 y 0,6 MeV. Posteriormente el núcleo hijo también decae por β^- , emitiendo electrones con energías entre 0 y 2,3 MeV. Por esta razón en el espectro medido existen dos cortes de altas energías, uno situado en 0,6 MeV que proviene del decaimiento del ^{90}Sr , y otro cerca de los 2 MeV que proviene del ^{90}Y . Éste último no llega a 2,3 MeV porque el espesor del detector usado no es suficiente para frenar por completo los electrones más energéticos. Este punto se discutirá más adelante. Otros de los detalles que se observan en los tres paneles de la Figura 4.3 es que el espectro presenta un corte abrupto para energías menores de 0,17 MeV, esto corresponde al umbral mínimo de detección del analizador multicanal (11 canales o ~ 107 mV).

En los otros dos paneles se muestran los resultados de las mediciones de los espectros de energía correspondientes a la emisión de electrones provenientes de las fuentes ^{36}Cl y ^{99}Tc . En estos dos últimos casos el espesor del detector SBD es suficiente para frenar completamente los electrones incidentes, por lo que el espectro medido se ajusta muy bien con el calculado en la referencia [62],[63].

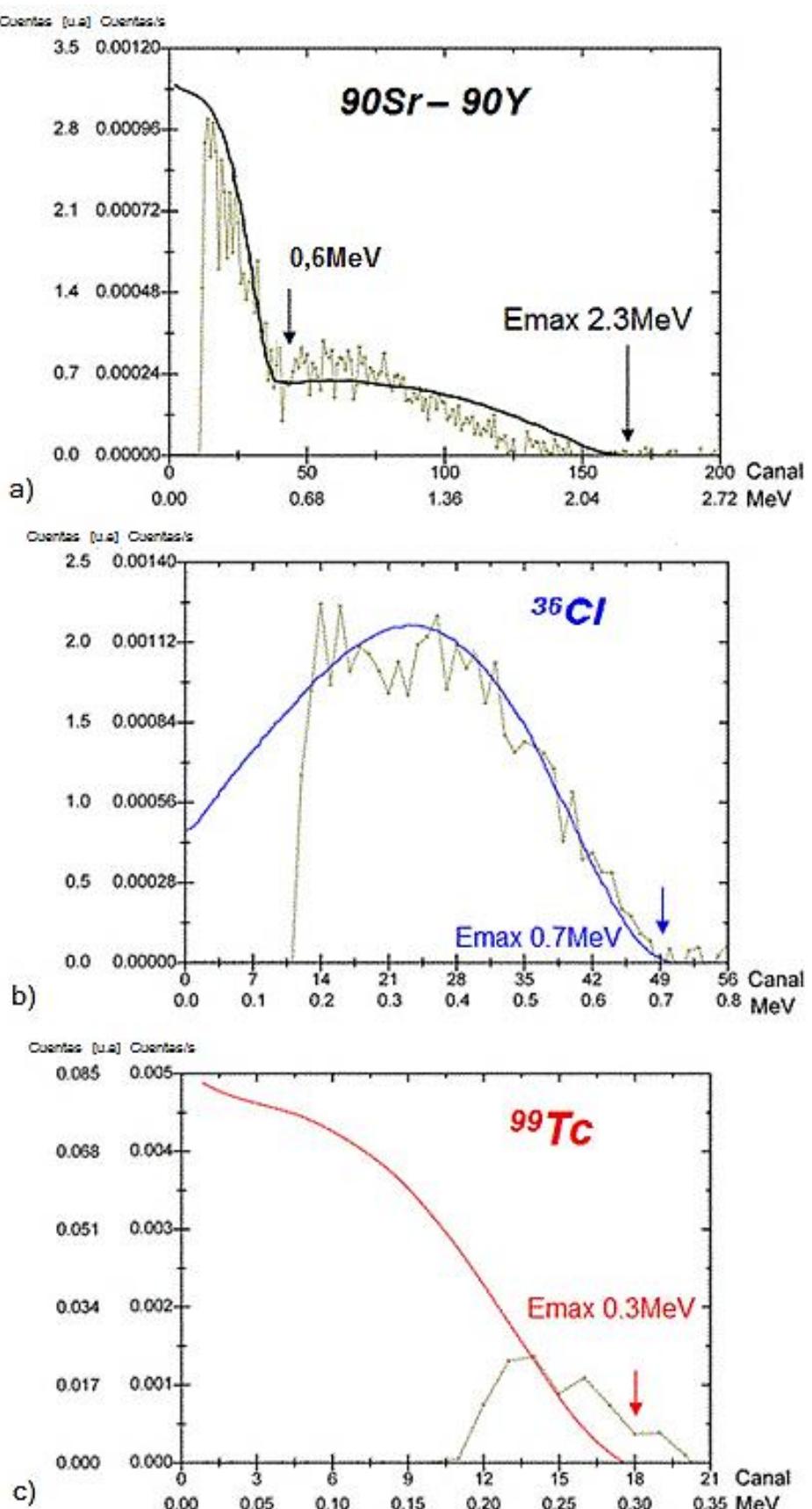


Figura 4.3 - Espectros en energía de los electrones emitidos por las fuentes a) $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$, b) ^{36}Cl y c) ^{99}Tc . Los mismos fueron adquiridos según la geometría mostrada en la Figura 4.1, y normalizados con el tiempo de adquisición.

En la Figura 4.4 se muestra el montaje experimental para medir la influencia de la presencia del colimador de aluminio a la entrada del LEEP. En el arreglo anterior solo se colimó la entrada del detector y la salida de la fuente emisora de electrones montados a una distancia equivalente a la longitud del colimador del LEEP ($\sim 3,5$ cm). Para este caso se ensayaron dos geometrías, una con el LEEP completo, y otra con el LEEP desmontado de manera que el colimador era directamente un cilindro de aluminio que podía ser emplazado o retirado más fácilmente para realizar la experiencia (Figura 4.5).

La única diferencia entre las dos configuraciones de la Figura 4.4 es la longitud de los colimadores que difieren por solo 3 mm. Para el caso a) la distancia fuente detector es de 3,7 cm por lo que en aire los electrones se frenan hasta $\sim 0,047$ MeV; y en el caso b) cuya distancia es de 3,4 cm los electrones se frenan hasta $\sim 0,045$ MeV. Las láminas de aluminio en ambos casos son de $10\text{ }\mu\text{m}$ de espesor, el cual frena electrones de hasta $\sim 0,040$ MeV, lo cual es despreciable considerando energías máximas de los electrones de hasta $\sim 2,3$ MeV.

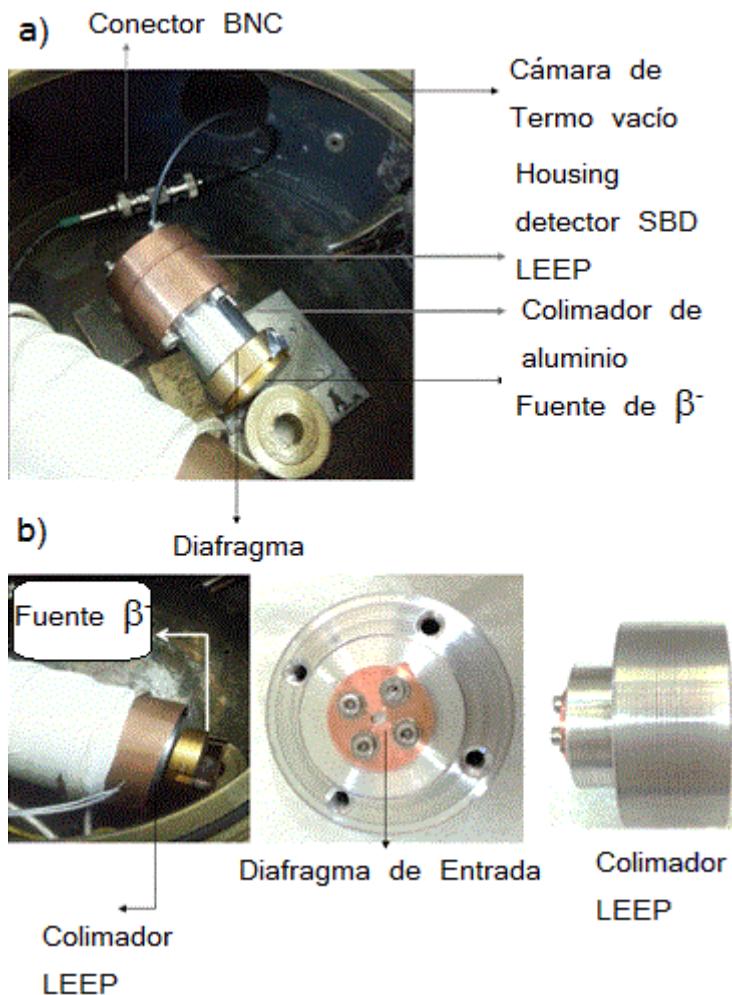


Figura 4.4 - Montaje experimental para medir espectro de electrones intercambiado los colimadores de entrada del LEEP: a) SBD (sin diafragma detector) + colimador de $Al_{3,7cm}$ + lámina de aluminio ($10\ \mu m$) + diafragma + fuente β^- , b) LEEP completo con su colimador de $Al_{(3,4cm)}$ + fuente β^- .

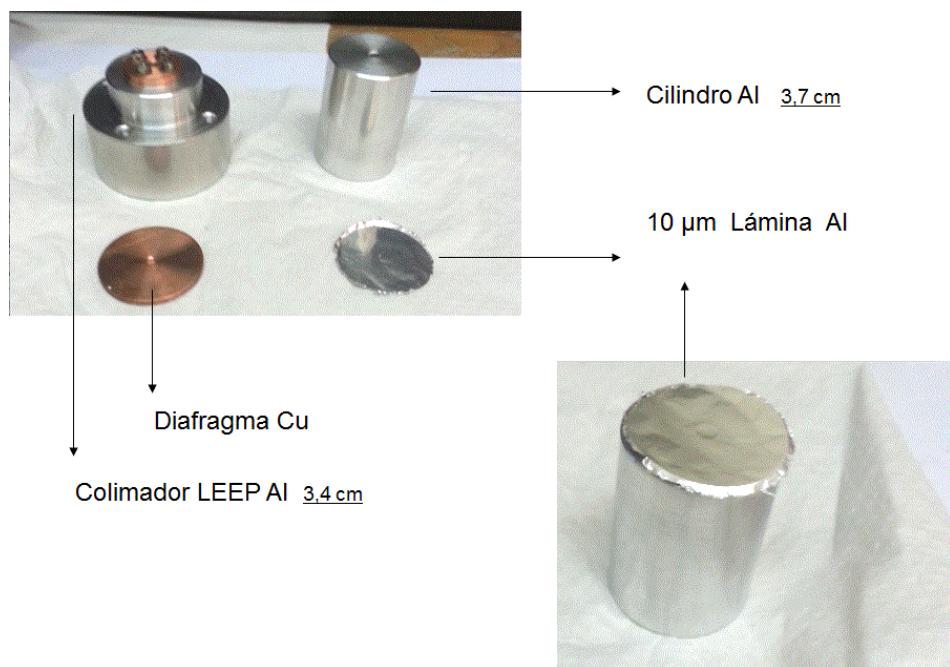


Figura 4.5 - Componentes empleados para los montajes experimentales de la Figura 4.4.

En la Figura 4.6 se muestran los espectros medidos con la fuente de ^{90}Sr - ^{90}Y , con los dos colimadores. Se puede observar que no existe diferencia entre los espectros beta para los dos montajes equivalentes.

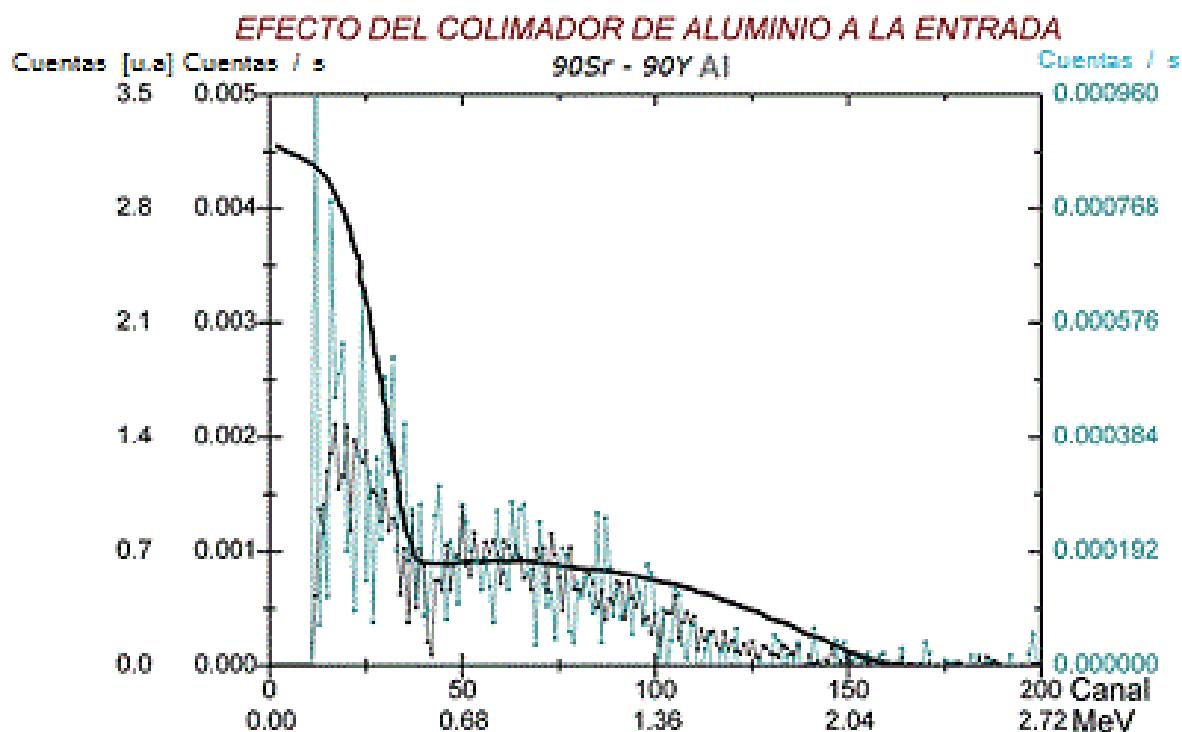


Figura 4.6 Comparación de los espectros β^- empleando los montajes experimentales de la Figura 4.5 para los colimadores de Al.

Se realizó otra prueba para ver el efecto de la lámina de aluminio de 10 μm de espesor a la entrada del detector. Para ello se tomaron los espectros de electrones que se muestran en la Figura 4.7 empleando la fuente de ^{90}Sr - ^{90}Y , con y sin lámina de aluminio. No se observa diferencia alguna entre estos espectros, por lo que la presencia de la lámina de aluminio necesaria para bloquear la luz en los detectores, no afecta el espectro de electrones. Sí afectará el de protones ya que estos perderán alrededor de 0,9 MeV según la curva de respuesta del LEEP que se muestra en la Figura 2.6.b, y las partículas alfas perderán $\sim 2,4$ MeV según los espectros medidos que presentamos en la Figura 4.8, y que están en muy buen acuerdo con lo estimado en la curva de respuesta del LEEP (Figura 2.6.b).

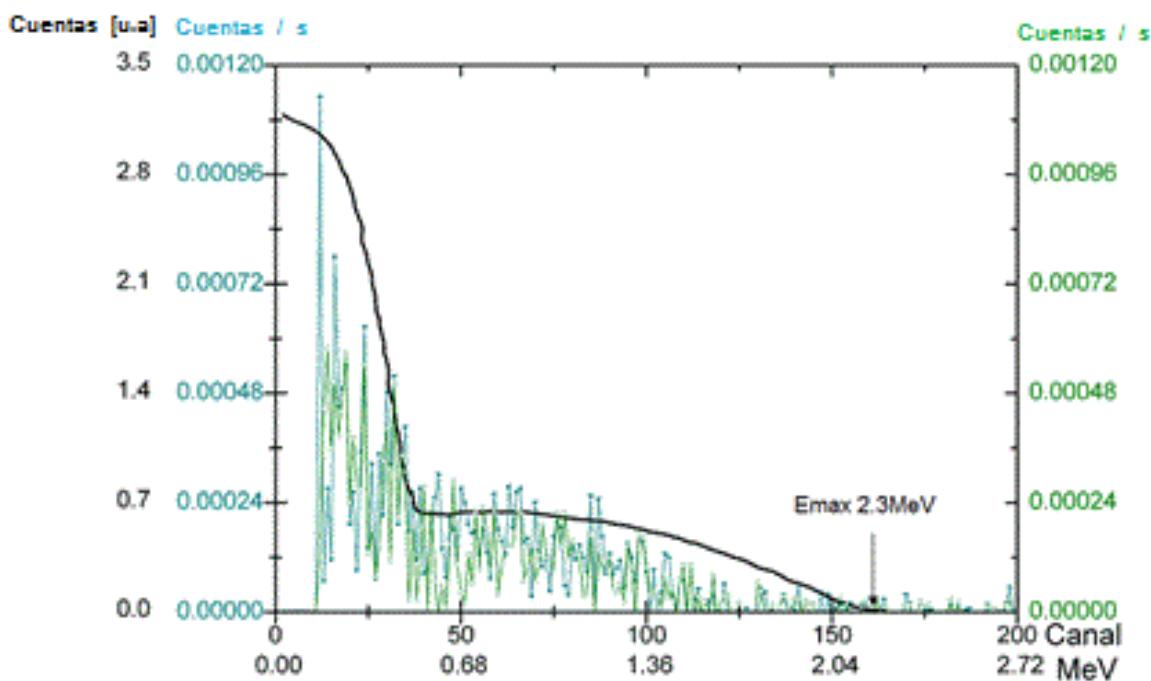


Figura 4.7 Comparación de los espectros de electrones de la fuente ^{90}Sr - ^{90}Y , usando colimador, con (curva azul) y sin (curva verde) lámina de aluminio de 10 μm de espesor a la entrada del SBD.

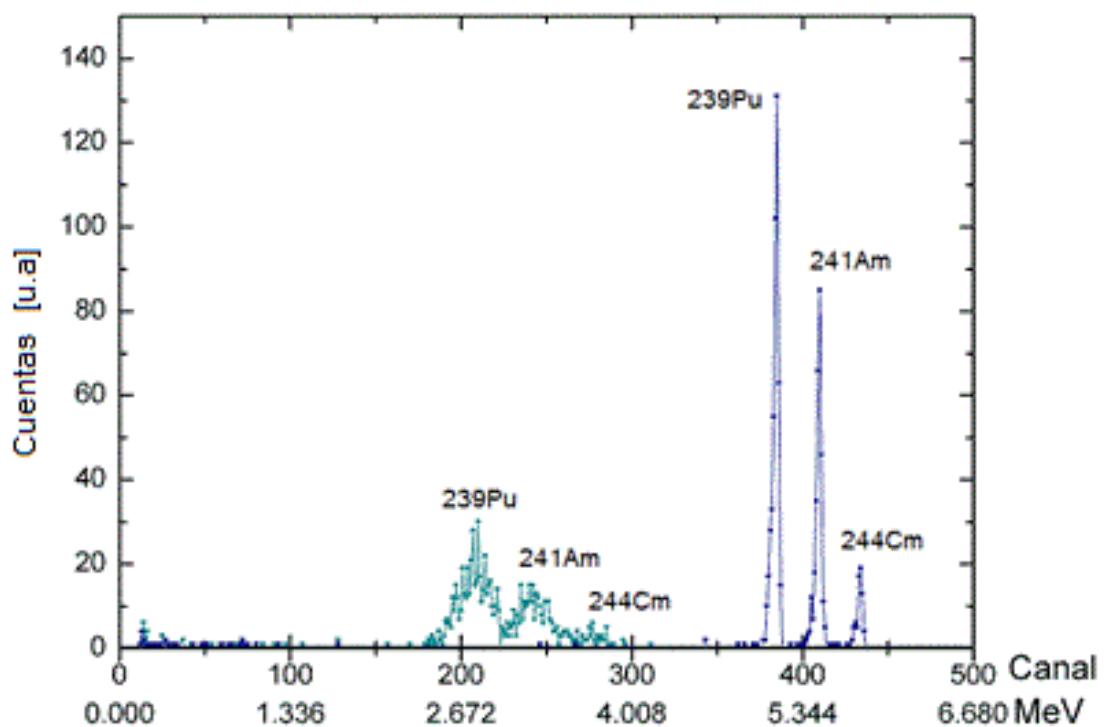


Figura 4.8 - Comparación de los espectros de partículas alfas de la fuente de calibración con (curva verde) y sin (curva azul) la lámina de aluminio 10 μm de espesor a la entrada del SBD.

Posteriormente se compararon los espectros de electrones para los casos con y sin colimador de aluminio empleando las fuentes de ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{36}Cl y ^{99}Tc . Éstos se muestran en la Figura 4.9 donde se observa una diferencia en el contaje de bajas energías: el espectro es más intenso cuando se remueve el colimador. Para ver si la diferencia está relacionada con el rango de energía de los electrones incidentes, se graficaron las curvas presentadas en la Figura anterior, en una nueva Figura (Figura 4.10) donde ahora están en la misma escala de energía. Se observa en todos los casos que el espectro se afecta para valores de energía menores a 0,44 MeV.

En el montaje experimental se incluyó un diafragma de cobre sobre el detector similar al que se encuentra montado en el colimador del LEEP (Figura 4.4b), y otro colimador de bronce sobre la fuente de β^- , la única diferencia entre los espectros proviene de colocar el cilindro de aluminio que tiene un hueco con un diámetro 3 mm y un largo de 37 mm, similar al montaje del colimador del LEEP. El hecho de tener los colimadores es para que el detector reciba solo las partículas que realizan trayectorias directas desde la fuente al detector, y que al agregar el cilindro de aluminio solo se observe el efecto de este último. Al poner el colimador, uno puede esperar que electrones que antes no llegarían al detector porque salen de la fuente con un ángulo mayor que el subtendido por los dos diafragmas, puedan ser dispersados por las paredes internas del colimador hacia el detector, por lo cual uno esperaría un conteo mayor de electrones por este efecto, sin embargo sucede lo contrario. Para encontrar la razón de esta diferencia uno debería simular las dos geometrías empleadas y evaluar los procesos de dispersión que pueden tener los electrones energéticos en el aire y en las distintas componentes del montaje, pero esto escapa a los tiempos disponibles para la realización de la tesis.

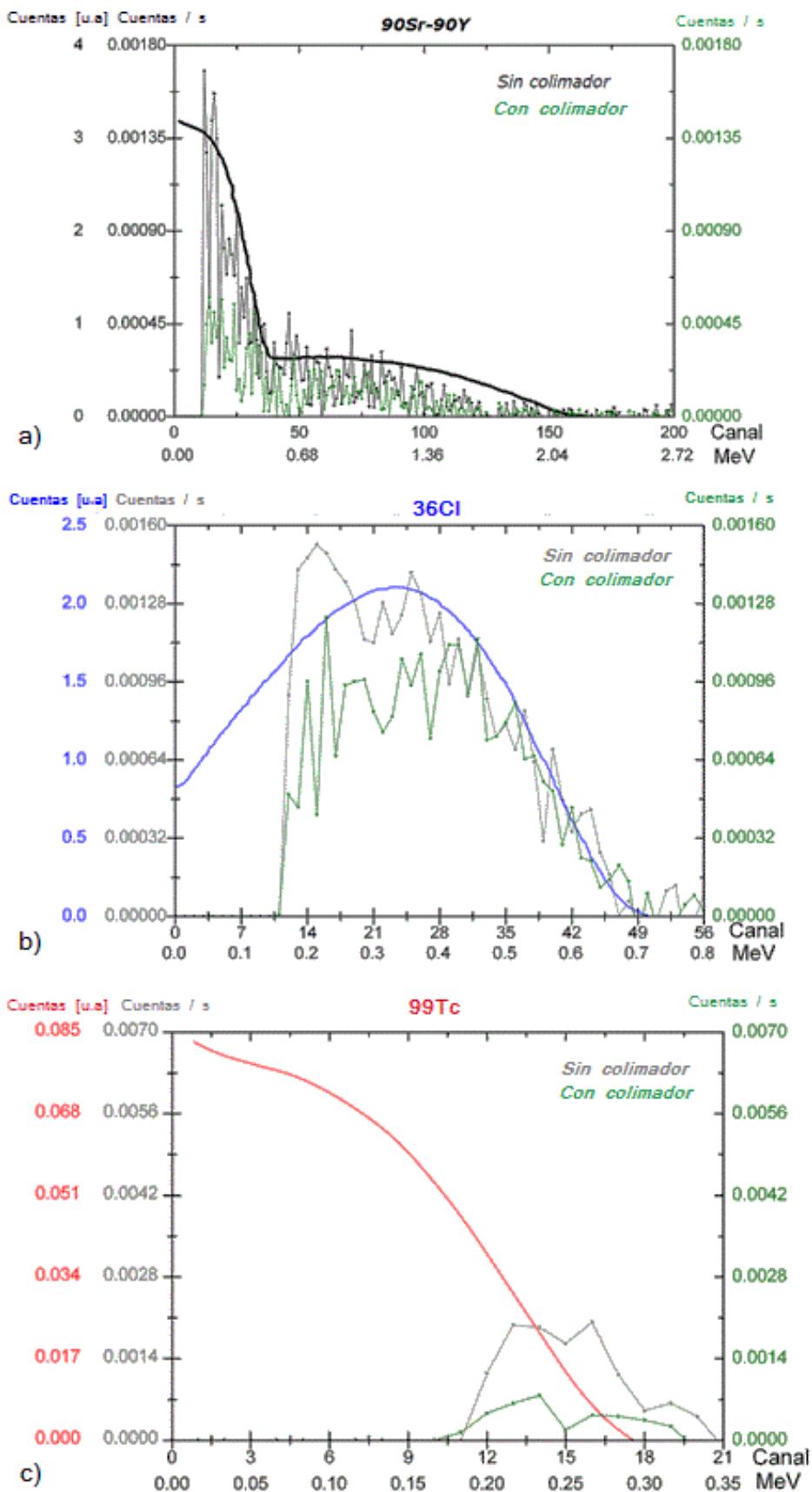


Figura 4.9 - Comparación de los espectros de electrones de las fuentes a) ^{90}Sr - ^{90}Y , b) ^{36}Cl , y c) con (curva verde) y sin (curva gris) colimador de entrada del LEEP. También se incluyen las curvas calculadas para cada espectro según la referencia. [62],[63]

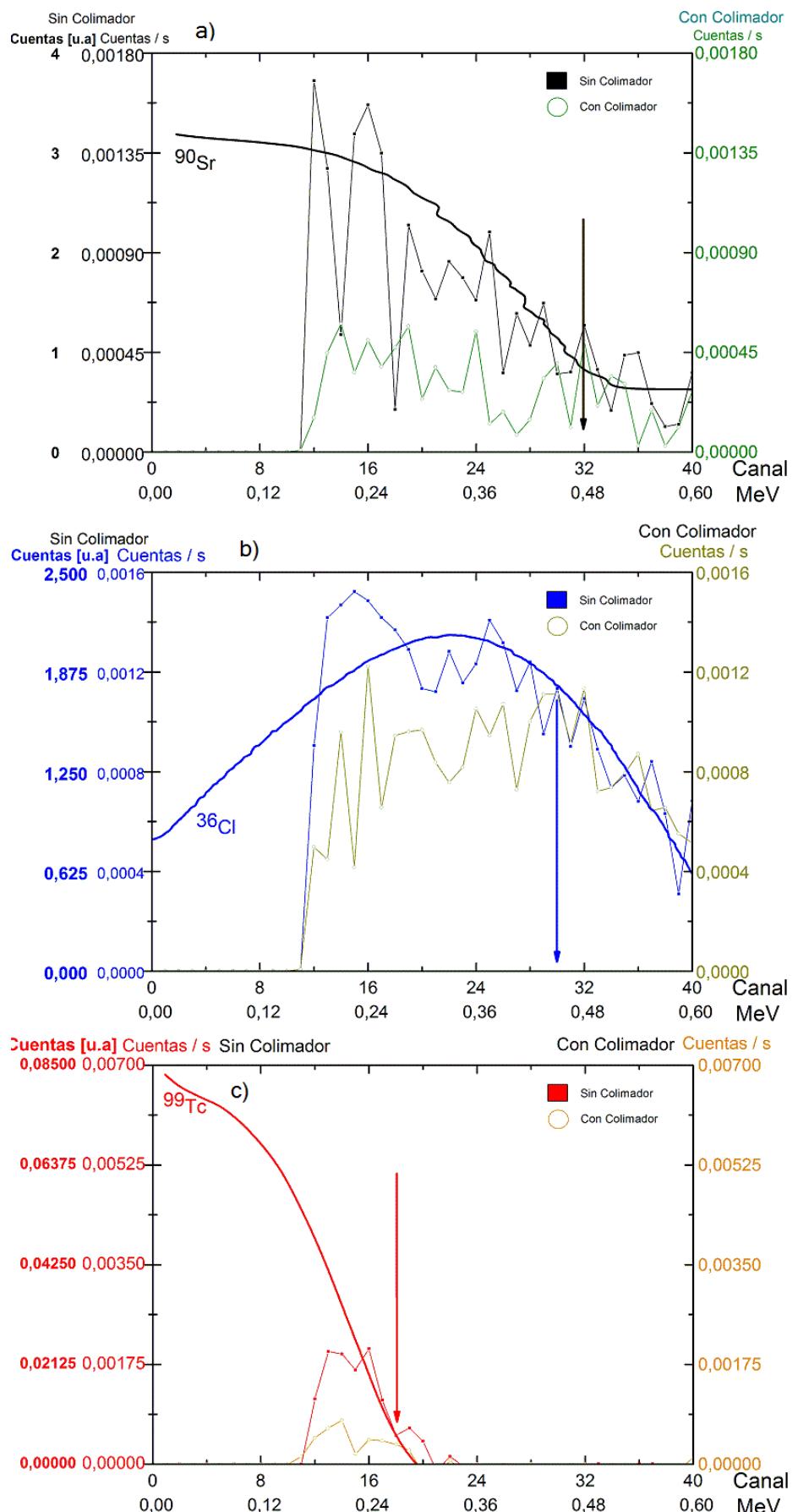


Figura 4.10 - Comparación de espectros de electrones a bajas energías para las fuentes a) ^{90}Sr - ^{90}Y , b) ^{36}Cl , y c) ^{99}Tc con y sin colimador de entrada del LEEP.

4.1.2 MEDICIONES CON DETECTOR ULTRA DE 500 μm

Para caracterizar los otros detectores empleados en el MARE se hicieron mediciones de electrones energéticos empleando un detector tipo ULTRA TU-013-050-500 (No totalmente depletado) de la empresa ORTEC con un espesor de 500 μm . Como en el caso anterior, lo primero que se hizo es levantar la curva de ganancias vs tensión de polarización para determinar el potencial de trabajo, y se calibró en energía el sistema compuesto con el detector más el prototipo de la cadena analógica A225F+A275FC+BLR1 de vuelo implementada en la tesis. Para ello se midieron los espectros de energía de las partículas alfas provenientes de la fuente de calibración en la cámara de vacío, a una presión de $\sim 10^{-3}$ Torr. En la Figura 4.11 se muestra la curva de calibración obtenida para una tensión de polarización del detector de 100 V, que es la que resultó de observar la saturación de la ganancia de toda la cadena de detección; junto con una imagen del montaje experimental donde se muestra el cilindro de aluminio usado como colimador y una fuente radioactiva emisora de electrones.

Una vez realizada la calibración se adquirió el espectro de electrones usando la fuente de β^- ^{90}Sr - ^{90}Y , y se la comparó con el tomado con el detector de 2000 μm . Ambos espectros se muestran en la Figura 4.12 donde se observa que la energía máxima medida para electrones de 2,3 MeV es de $\sim 0,8$ MeV para el detector de 500 μm de espesor, mientras que para el de 2000 μm es de $\sim 1,8$ MeV. Ambas energías máximas resultaron menores que la de las partículas incidentes, y tanto menor cuanto menor el espesor del detector. Esto se debe principalmente a que los electrones no pierden por completo su energía en la trayectoria que recorren dentro de los detectores, y la energía depositada es menor para los detectores más delgados.

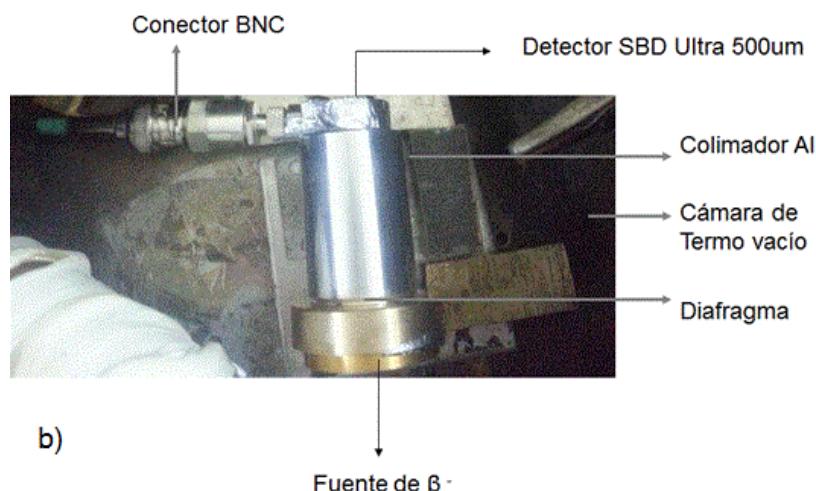
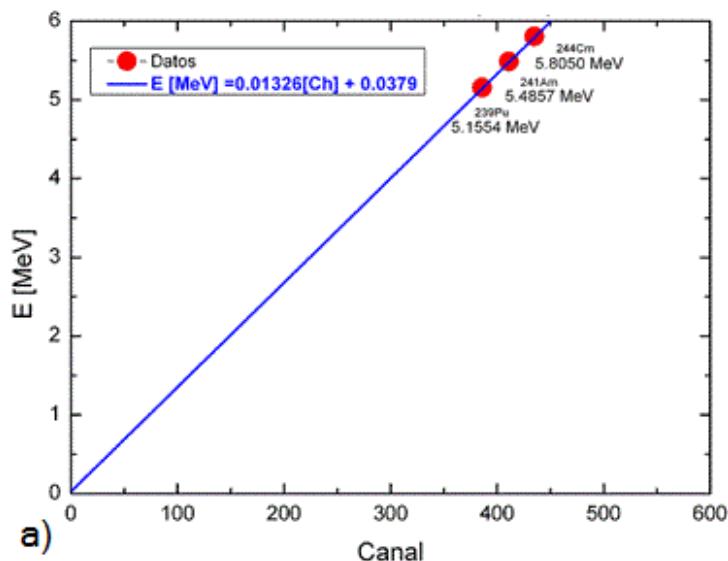


Figura 4.11 - a) curva de calibración en energía del sistema usando el SBD tipo ULTRA TU-013-050-500 de 500 μm de espesor, polarizando con HV = 100 V. Para esto se empleó la fuente de calibración alfa con las siguientes energías: 5,1534 MeV (^{239}Pu), 5,4857 MeV (^{241}Am), y 5,8050 MeV (^{244}Cm). b) Montaje para el experimento con electrones provenientes de una fuente β^- ^{90}Sr - ^{90}Y , con el colimador de aluminio y la lámina de aluminio de 10 μm .

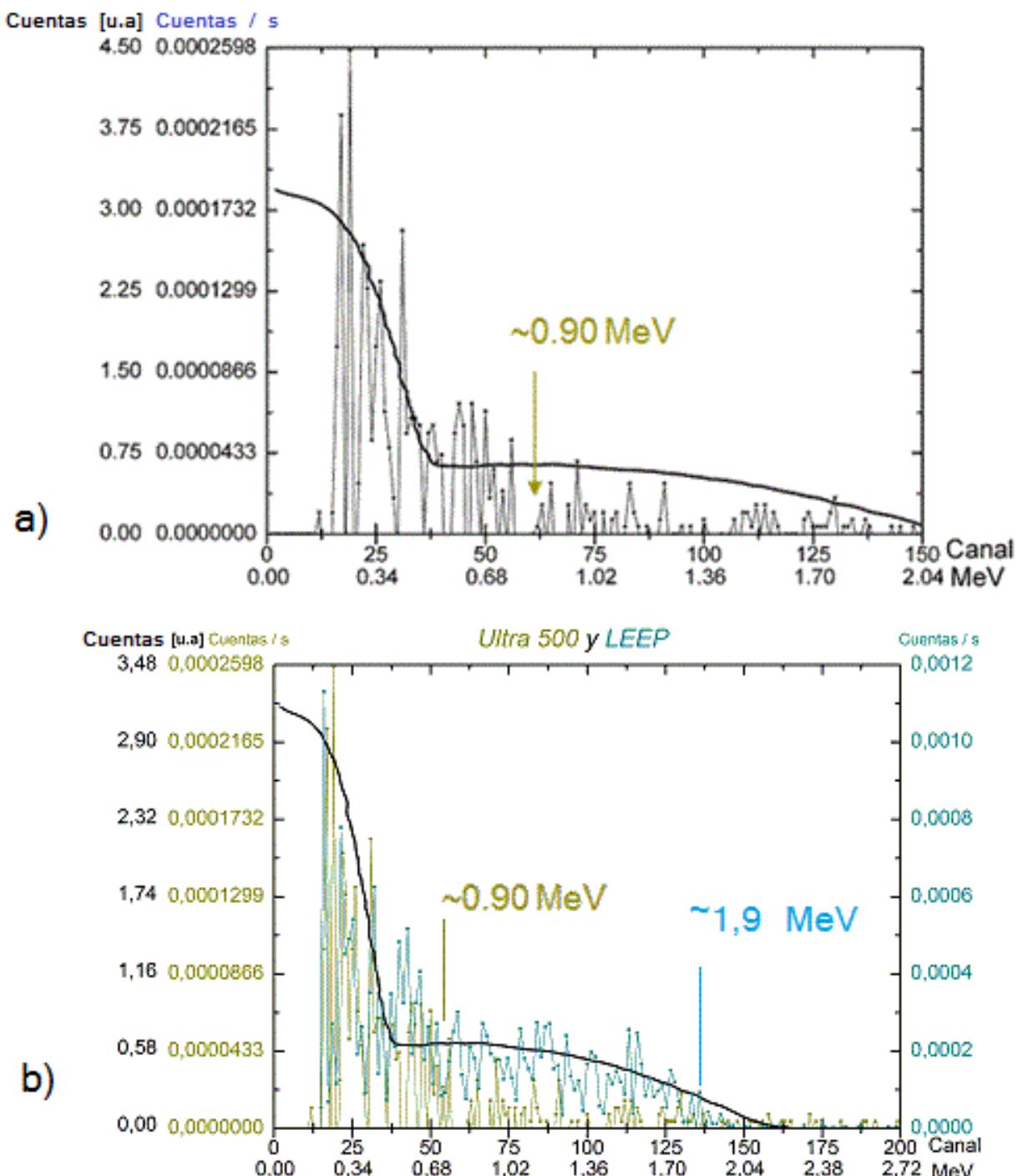
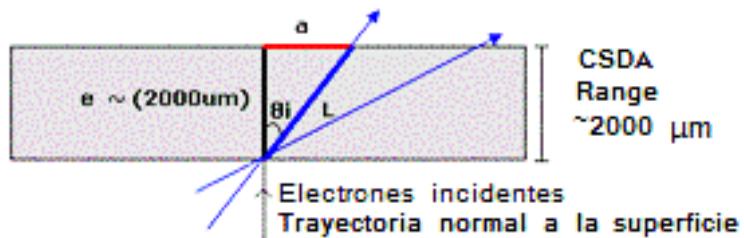


Figura 4.12 a) Espectro β^- obtenido con el detector TU-013-050-500 de 500 μm de espesor, con colimador y lámina de 10 μm Al, b) Comparación entre los espectros β^- obtenidos con detector el 500 μm (curva dorada) y el de 2000 μm de espesor (curva azul) con colimador y lámina de 10 μm Al.

La energía depositada por electrones en un espesor dado de silicio (material del detector) se puede obtener de las curvas de frenamiento ($-dE/dx$) provistas por el NIST [43], donde la energía depositada resulta $\Delta E = (-dE/dx) * \Delta x$. Como el poder de frenado para electrones de 2,3 MeV es aproximadamente 1,6 MeV.cm²/g, la energía depositada por los mismos en 500 μm y 2000 μm de espesores es 0,2 y 0,8 MeV, respectivamente; lo cual es mucho menor que los valores reportados en la Figura 4.12.

Un aspecto a tener en cuenta es que no todas las trayectorias de los electrones son normales al detector ya que éstos tienen una dada aceptación angular, por lo que el camino recorrido depende del ángulo de incidencia de la partícula. Esto se esquematiza en la Figura 4.13 donde además se muestra el efecto de alargamiento de camino en función del ángulo de incidencia para un detector de 2000 μm de espesor. Como la aceptación angular del LEEP es pequeña (4°) la corrección por alargamiento de camino es muy pequeña, por lo que no es suficiente para explicar la diferencias en los resultados experimentales. Para poder explicar la energía depositada por este modelo, la longitud de la trayectoria necesaria para depositar 1,8 MeV (caso del detector de 2000 μm) debería ser aproximadamente 4800 μm , lo que implicaría un ángulo de entrada al detector de 65° .



$$L = e * (\cos \theta i)^{-1} \quad (1)$$

$$a = L \operatorname{sen} \theta i \quad (2)$$

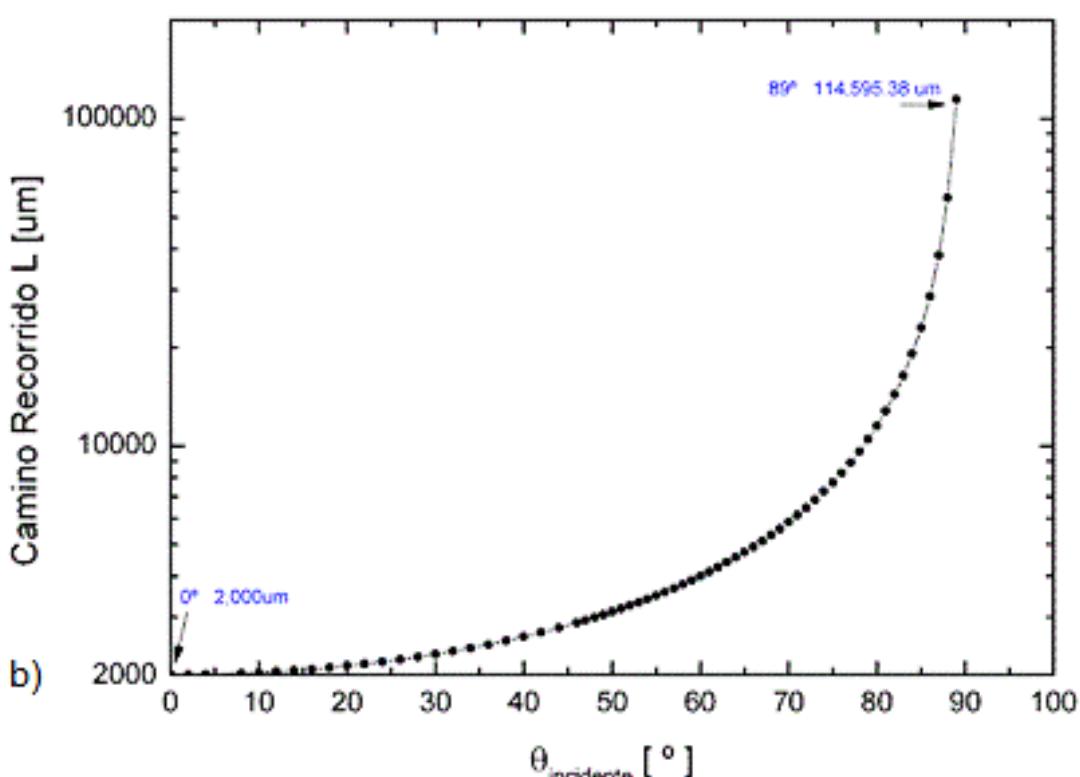


Figura 4.13 - a) Esquema de trayectorias de electrones en 2000 μm de silicio, b) Camino recorrido por electrones en función del ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es que los electrones pueden sufrir colisiones dentro del material de forma tal que la trayectoria ya no es más rectilínea sino quebrada. Como los electrones interactúan fuertemente con otros electrones que tiene igual masa, la dispersión elástica es muy importante; y como existe en el sólido una alta densidad de electrones, la probabilidad de sufrir múltiples colisiones (multiple scattering) es también muy alta. Estos procesos dan lugar a un incremento muy grande en el camino neto recorrido por los electrones en el detector.

Para tratar de evaluar este efecto se hicieron simulaciones con el programa *foil trans electron beam propagation* [64] en su versión de demostración. Este programa calcula las trayectorias de los electrones cuando atraviesan una lámina delgada de Al-Be, y provee el espectro de energía de los electrones que atravesaron el detector. El resultado de la simulación para electrones incidiendo con 2,3 MeV sobre una lámina de 2000 μm se muestra en la Figura 4.14. Lo primero que se observa es una importante dispersión angular del haz de electrones al atravesar la lámina, la mayoría de éstas se concentran en un cono de 45° de semi-apertura, lo que implica un alargamiento de longitud de trayectorias de al menos un 40%. Por otro lado, si nos fijamos en la distribución en energías de las partículas que atraviesan el detector se observa que hay algunas pocas partículas con energías cercanas a cero, es decir, que depositaron casi toda su energía en el detector. La energía a partir de la cual la distribución comienza a crecer está en $\sim 0,7$ MeV, lo cual indica una energía máxima depositada en el detector del orden 1,6 MeV, valor cercano al medido experimentalmente (1,8 MeV).

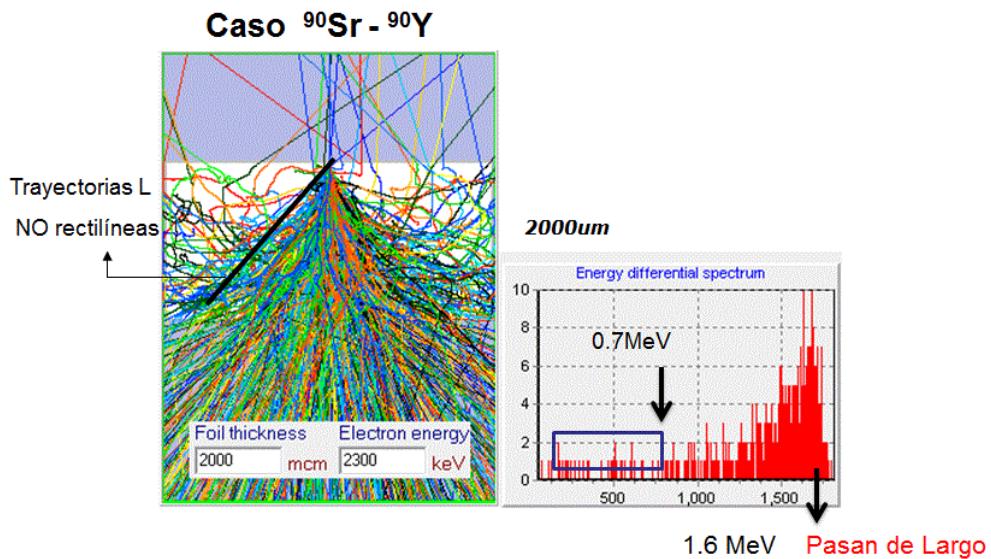


Figura 4.14 - Simulación de trayectorias y cálculo del espectro de electrones que atraviesan 2000 μm de Al-Be realizado con el programa FoilTrans [64]. La energía de los electrones incidentes es de 2,3 MeV.

También se hicieron las simulaciones correspondientes al detector de 500 μm de espesor que se muestran Figura 4.15. Lo primero que se observa es que al ser el detector más delgado, la dispersión angular del haz de electrones al

atravesar la lámina es menor que en el caso de 2000 μm . La mayoría de las trayectorias se concentran en un cono menor de 30° de semi-apertura, lo que implica un alargamiento de longitud de trayectorias de a lo sumo un 15%. Por otro lado, si nos fijamos en la distribución en energías de las partículas que atraviesan el detector se observa que la energía a partir de la cual la distribución comienza a crecer está en $\sim 1,9$ MeV, lo cual indica una energía máxima depositada en el detector del orden 0,4 MeV, que duplica la energía estimada por el frenamiento de electrones en Si (0,2 MeV) pero es menor al observado experimentalmente (0,8 MeV). Esta diferencia puede ser debida a que el demo del programa FoilTrans solo calcula las trayectorias para Al-Be que tiene un poder de frenado y una dispersión elástica menor que en el caso del Si.

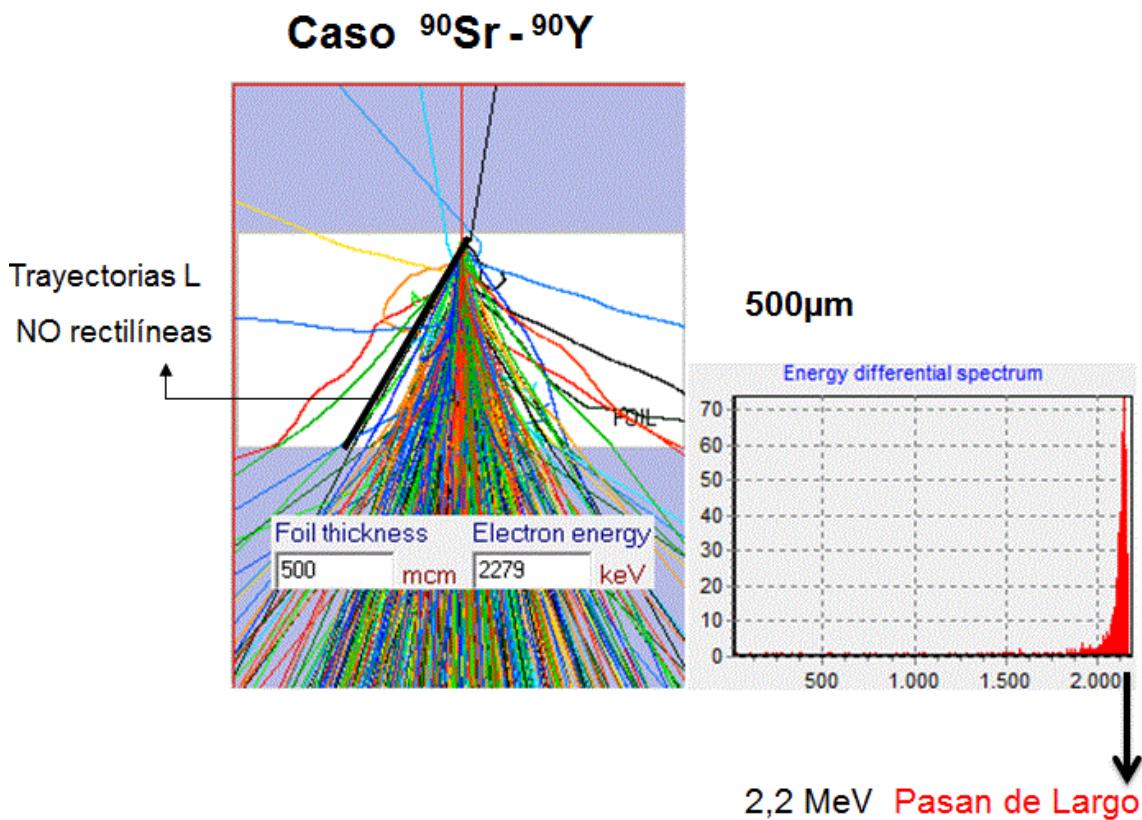


Figura 4.15 - Simulación de trayectorias y cálculo del espectro de electrones que atraviesan 500 μm de Al-Be realizado con el programa FoilTrans [64]. La energía de los electrones incidentes es de 2,3 MeV..

4.2 PRUEBAS CON EL FILTRO MAGNÉTICO DEL PROTOTIPO DEL DETECTOR PT.

El filtro magnético del detector telescopico PT fue diseñado con la idea de evitar que electrones energéticos pasen a través de él, mientras que partículas

más pesadas como protones y alfas sí puedan hacerlo. En esta parte del trabajo reportamos los resultados de la caracterización del prototipo armado para el proyecto MARE, para lo cual empleamos fuentes radioactivas emisoras de β^- y alfas de varios MeV de energía incidente.

En la Figura 4.16 se presenta el montaje experimental para medir los espectros de energía de los electrones emitidos de la fuente ^{90}Sr - ^{90}Y con energías máximas de 2,3 MeV que atraviesan el filtro magnético del PT y llegan al SBD de 2000 μm de espesor. En la Figura 4.17 se muestra el espectro de electrones medido en esas condiciones y se lo compara con el calculado según la referencia [62],[63] en la misma escala de los espectros tomados en la sección 4.1. Se puede observar como el filtro magnético empleado en el montaje experimental de la Figura 4.16, desvía todos los electrones provenientes de la fuente β^- con energías entre 0 y 2,3 MeV.



Figura 4.16 - Montaje experimental para prueba del filtro magnético prototipo del detector PT, con fuente de electrones incidentes con energías entre 0 y 2,3 MeV.

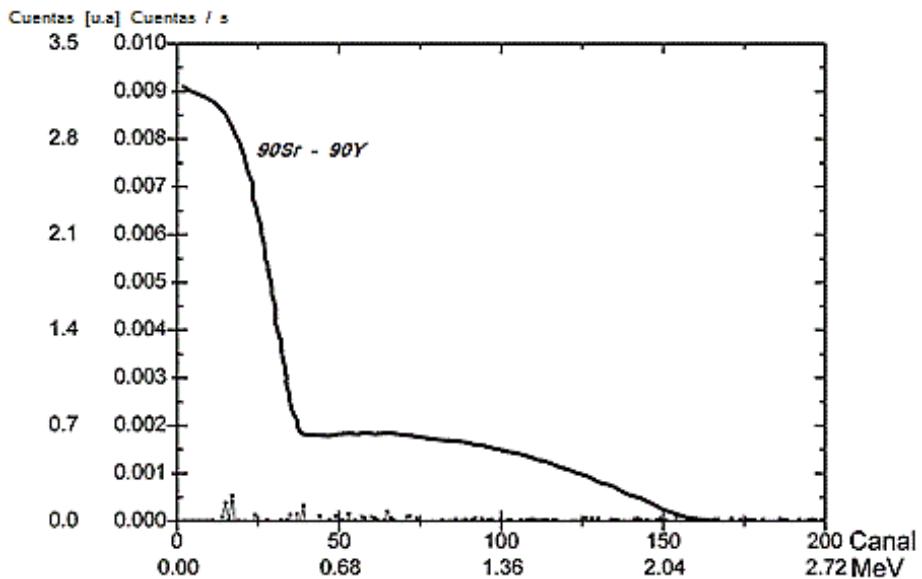


Figura 4.17 - Espectro de energías de los electrones que atraviesan el filtro magnético del detector PT. La línea de trazo representa el espectro que debería observarse sin dicho filtro.



Figura 4.18 Montaje experimental para la prueba del filtro magnético del prototipo del detector PT, usando alfas incidentes provenientes de ^{239}Pu ($E=5,1554\text{MeV}$), ^{241}Am ($E=5,4857\text{MeV}$) y ^{244}Cm ($E=5,8050\text{MeV}$). El experimento se realizó en vacío de bomba mecánica ($\sim 10^{-3}$ Torr).

En la Figura 4.18 se presenta el montaje experimental para medir los espectros de energía de las partículas alfas emitidas de la fuente de calibración con energías entre 5,15 MeV y 5,80 MeV que atraviesan el filtro magnético del PT y llegan al SBD de 2000 μm de espesor. En la Figura 4.19 se muestran los espectros medidos para el caso de interponer o sacar el filtro magnético sin su lámina de aluminio, y el efecto de poner el filtro completo con una lámina de Al de 10 μm . Para el primer caso se obtuvo prácticamente el mismo espectro, solo se observa una pequeña reducción en

el conteo de las partículas alfa al usar el filtro magnético. También se observó que la inclusión de la lámina de 10 μm de aluminio prevista para bloquear la luz incidente, frena los alfas del orden de 2,4 MeV, razón por la cual en el diseño del detector PT se incluye una lámina de aluminio con un espesor de 4 $\mu\text{m} < 10 \mu\text{m}$, capaz de frenar menos los alfas incidentes (4 μm de aluminio frena alfas de hasta $\sim 1,12$ MeV, es decir que en el diseño original los picos se ubicarían en 4 y 4,7 MeV aproximadamente).

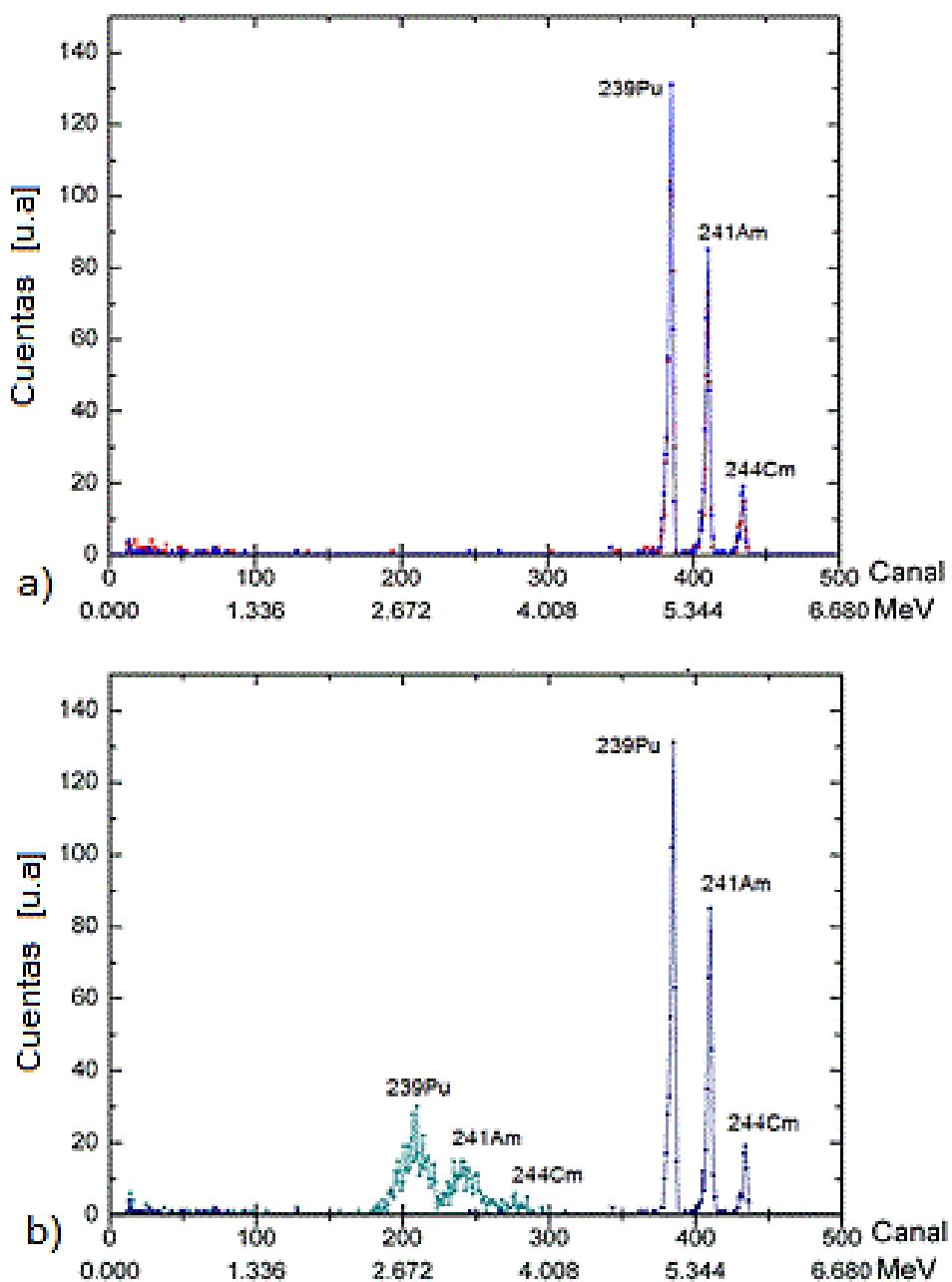


Figura 4.19 a) Comparación de espectros de alfas con filtro magnético sin lámina de aluminio y sin filtro magnético, b) Con filtro magnético, con lámina de 10 μm de aluminio y sin filtro magnético.

Para resumir, los resultados de los ensayos realizados en los detectores y sus componentes mediante el empleo de fuentes radioactivas emisora de partículas alfas y partículas β^- (electrones energéticos) mostraron que los filtros de entrada, ya sean las láminas delgadas de aluminio empleadas para bloquear la luz incidente, como los filtros magnéticos, son adecuados a los fines del presente proyecto. Como se previó, las láminas no afectan la energía de los electrones incidentes y frenan las partículas más masivas sin generar estructuras espurias en los espectros. El montaje del colimador del LEEP mostró una pequeña reducción de conteo solo para electrones con energías menores de 0,44 MeV; mientras que el filtro magnético del PT mostró ser eficiente en la eliminación de electrones de al menos 2,3 MeV de energía, y no afectó el espectro de partículas alfas de \sim 5 MeV. Finalmente, se demostró que los detectores de barrera de superficie fueron adecuados para la detección tanto de partículas alfas como de electrones energéticos, mostrando que para estos últimos el efecto de *multiple scattering* es importante y debe ser tenido en cuenta para determinar las curvas de respuesta de los diferentes detectores del MARE.

4.3 PRUEBAS TÉRMICAS DE LOS DETECTORES

Como ya se comentó en las secciones 2.4 y 3.4, el monitor MARE cambia su temperatura en función del tiempo (Figura 2.24) por lo que es necesario analizar cómo reacciona cada componente del sistema a estos cambios térmicos. En esta sección presentaremos los resultados de los estudios realizados sobre diversos detectores SBD de la empresa ORTEC.

Para realizar las pruebas térmicas se montó un cilindro de cobre con una cinta calefactora enrollada en él en la cámara de vacío donde se montaban los detectores (dentro del cilindro) y la fuente alfa de calibración (a unos centímetros del cilindro). La termocupla que medía la temperatura se fijaba directamente sobre el detector que se deseaba verificar, y toda la electrónica asociada estaba fuera de la cámara a temperatura ambiente (Figura 4.20). De esta forma se busca evaluar solo el efecto de la temperatura sobre los

detectores y no sobre el conjunto; en particular, el efecto de la temperatura en la electrónica analógica ya se estudió en la sección 3.4.

4.3.1 DETECTOR ULTRA DE 100 μm DE ESPESOR.

El primer detector que se estudió es un CU-014-50-100 tipo ultra de 100 μm de espesor de la empresa ORTEC polarizado con HV = 60 V. La cadena analógica de detección utilizada es el prototipo implementado con los componentes de vuelo, y el analizador multicanal es un Oxford PCA III con una ganancia de 512 canales.

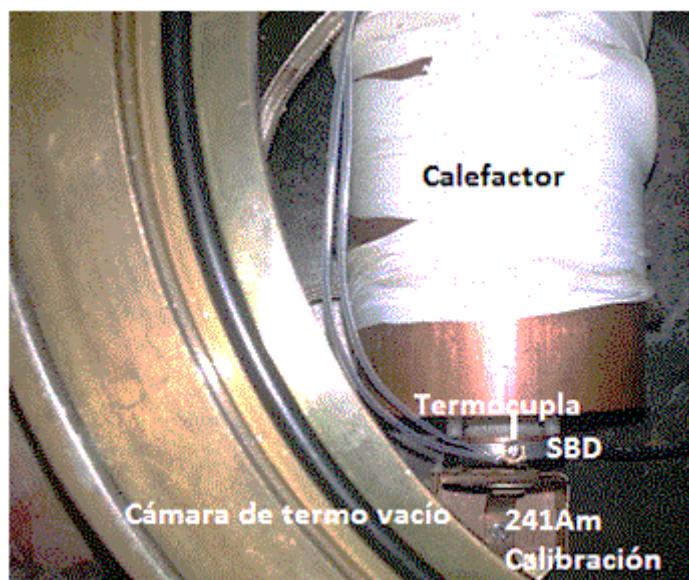


Figura 4.20 - Montaje del detector CU-014-50-100 tipo ultra de la empresa ORTEC en la cámara de vacío para la caracterización térmica.

En la Figura 4.21 se muestran los resultados de medir los espectros de energía de la fuente alfa de calibración en función de la temperatura del detector. En la Figura 4.22 se muestran: la intensidad del ruido (integral de los espectros entre los canales 1 y 20), el valor máximo del canal (energía) asociado al ruido, y la posición y el ancho de los picos de la fuente alfa, en función de la temperatura del detector. Se puede observar en esas Figuras que el ruido crece muy poco en intensidad, y que el rango de energía asociado ($E < 0,25 \text{ MeV}$) prácticamente no cambia para temperaturas menores a los 50 °C. Además se puede ver que la calibración en energías se mantiene, aunque la resolución en energía de los picos crece un poco, desde

0,078 MeV a 25 °C hasta 0,156 MeV a 57 °C. Este tipo de comportamiento es el usual para este tipo de detectores en el cual se garantiza un rango de operación de -196 a +60 °C [48].

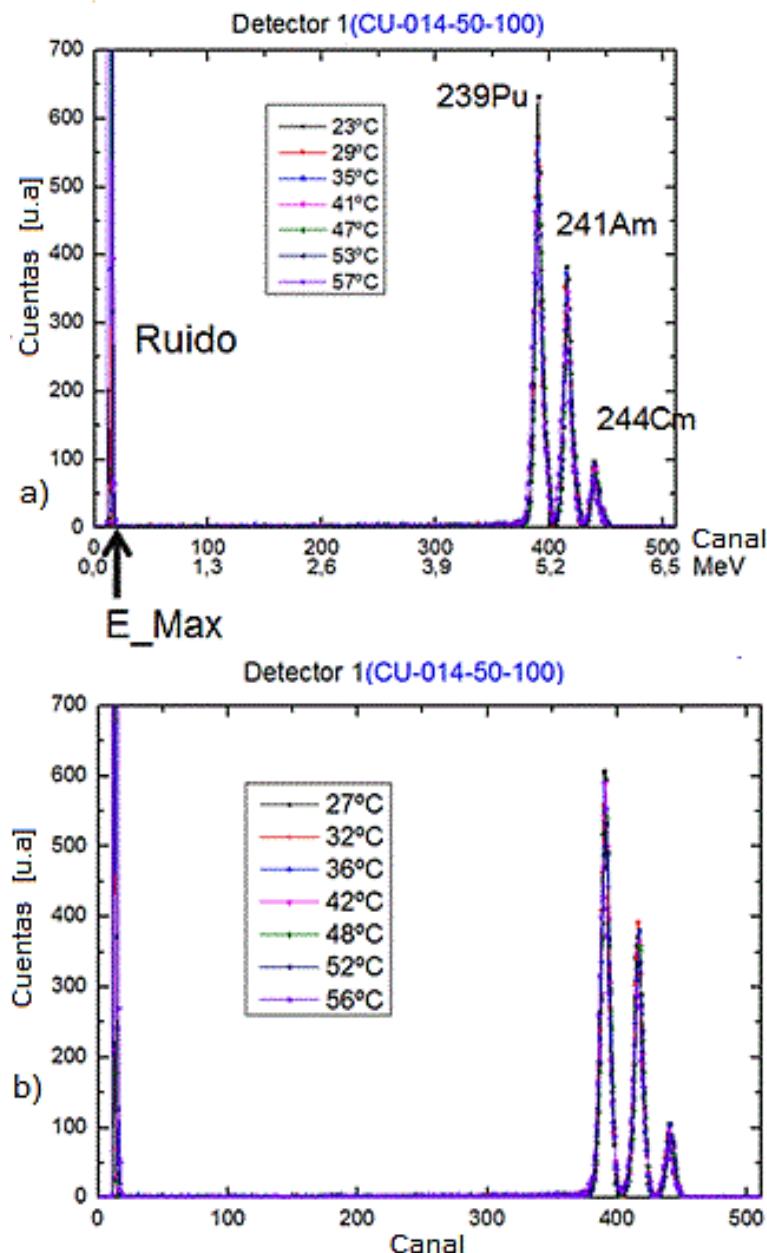


Figura 4.21 - Caracterización térmica del detector CU-014-50-100 tipo ultra de 100 μm de espesor, a) incrementando la temperatura (Subida) y b) disminuyendo la temperatura (Bajada).

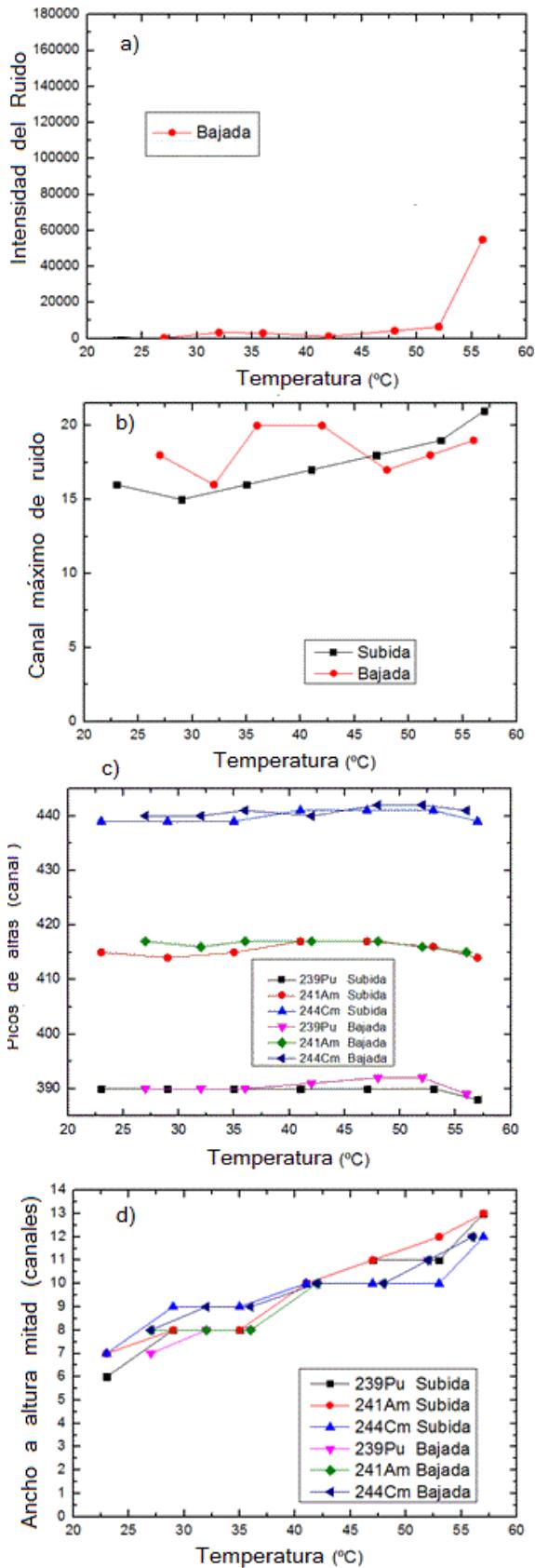


Figura 4.22 - Análisis térmico del detector ultra CU-014-50-100 de 100 μm de espesor: a) Integral del espectro en los canales 1 a 20 asociado al ruido, b) posición del canal máximo asociado al ruido, c) posición de los picos alfas, y d) ancho a mitad de altura (FWHM) de los picos alfas.

4.3.2 DETECTOR TIPO AA DE 2000 μm

Para este caso se hicieron pruebas térmicas con el mismo arreglo experimental de la Figura 4.20, empleando un detector AA-018-100-2000 de 2000 μm de espesor de la empresa ORTEC polarizado con HV = 200 V. El requisito de medir la energía de los electrones y los protones en el mayor rango posible, se resolvía empleando detectores con un espesor grande, para los cuales el valor límite en temperatura de operación recomendado por el fabricante es de hasta 25 °C [48]. Es conocido que al aumentar la temperatura debería aumentar el ruido y perder resolución en energía, pero no se encontró en la bibliografía datos de cuán grande puede ser en este tipo de detectores, por eso la importancia de la presente caracterización.

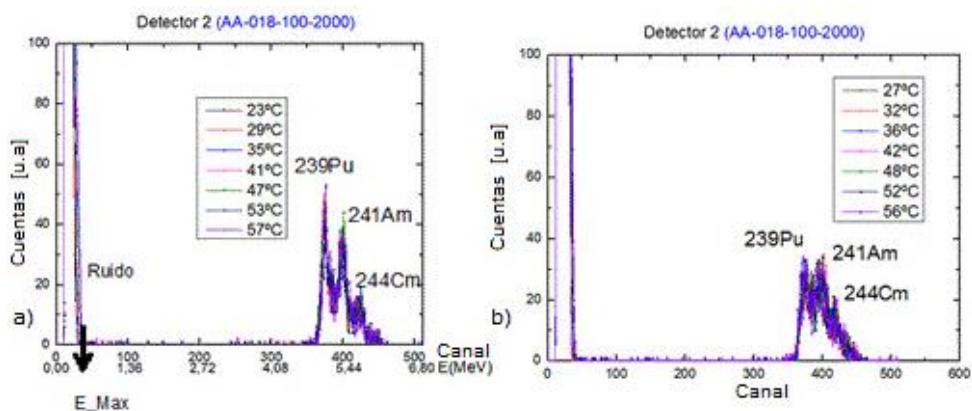


Figura 4.23 - Caracterización térmica del detector AA-018-100-2000 tipo A de 2000 μm de espesor, a) incrementando la temperatura (Subida) y b) disminuyendo la temperatura (Bajada).

En la Figura 4.23 se muestran los resultados de medir los espectros de energía de la fuente alfa de calibración en función de la temperatura del detector, y en la Figura 4.24 se muestran: la intensidad del ruido (integral de los espectros entre los canales 1 y 30), el valor máximo del canal (energía) asociado al ruido, y la posición y el ancho de los picos de la fuente alfa, en función de la temperatura del detector. Se puede observar en esas Figuras que el ruido se mantiene hasta los 40 °C y luego crece en intensidad, y que el rango de energía asociado también crece hacia energías mayores, incrementándose en más de 0,15 MeV. Además se puede ver que la calibración en energías se mantiene, aunque la resolución en energía de los picos crece manteniendo el contejo total en cada pico.

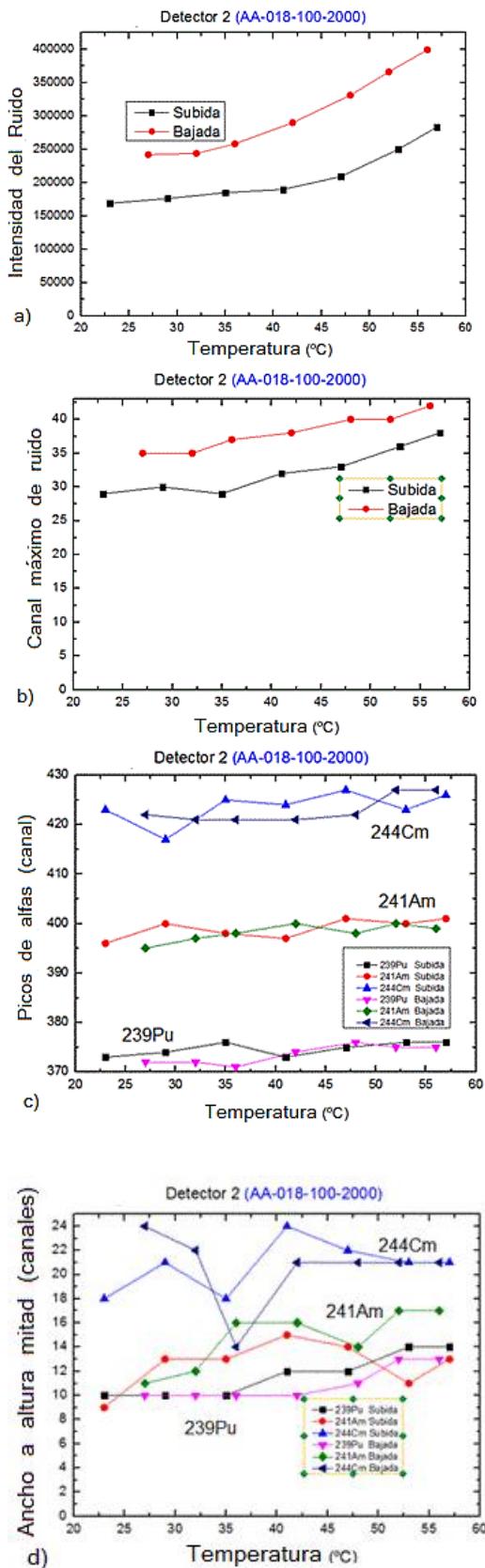


Figura 4.24 - Análisis térmico del detector AA-018-10-2000 tipo A de 2000 μm de espesor:
a) Integral del espectro en los canales 1 a 30 asociado al ruido, b) posición del canal máximo asociado al ruido, c) posición de los picos alfas, y d) ancho a mitad de altura (FWHM) de los picos alfas.

Si comparamos ambos tipos de detectores lo que se observó es que el detector ULTRA mantiene una mejor performance al variar la temperatura si se lo compara con respecto a la serie A. Se observa que la intensidad del ruido total resulta 2,4 veces menor, y la energía máxima asociado al ruido resulta la mitad; sin embargo, las características del detector tipo A fueron adecuadas en la medición de espectros con fuentes β^- durante el desarrollo del proyecto.

4.3.3 DETECTOR TIPO AB DE 150 μm DE ESPESOR

Se repitió nuevamente el proceso de análisis térmico bajo las mismas condiciones de temperatura entre 25 y 57 °C, para un detector AB-016-050-150 tipo B (Completamente depletado), con espesor de 150 μm de la empresa ORTEC, polarizado con HV = 40 V. Este tipo de detector tiene también una temperatura máxima de operación sugerida por el fabricante de 25 °C, por lo cual también resulta importante estudiar su performance ante los cambios de temperatura de operación del MARE.

En la Figura 4.25 se muestran los resultados de medir los espectros de energía de la fuente alfa de calibración en función de la temperatura del detector, y en la Figura 4.26 se muestran: la intensidad del ruido (integral de los espectros entre los canales 1 y 50), el valor máximo del canal (energía) asociado al ruido, y la posición y el ancho de los picos de la fuente alfa, en función de la temperatura del detector. Se puede observar en esas Figuras que el ruido prácticamente no cambia hasta los 40 °C, pero a partir de esa temperatura se incrementa enormemente, y que el rango de energía asociado crece monótonamente hasta extenderse a 0,64 MeV para 55 °C. Además se puede ver que la calibración en energías se mantiene hasta los 47 °C, pero luego disminuye alrededor de un 30 % para 57 °C. La resolución en energía de los picos crece poco hasta los 42 °C (0,054 MeV) pero se aumenta enormemente a los 57 °C (1,06 MeV). También se observa una pérdida de cuentas en los picos de los alfas, en donde los máximos caen a valores ~ 4 veces menores a 57 °C, respecto a las cuentas máximas a 25 °C. Este comportamiento a altas temperaturas llama la atención y parece provenir de un efecto de apilamiento de pulsos, tal vez debido a un fuerte incremento del ruido en el detector.

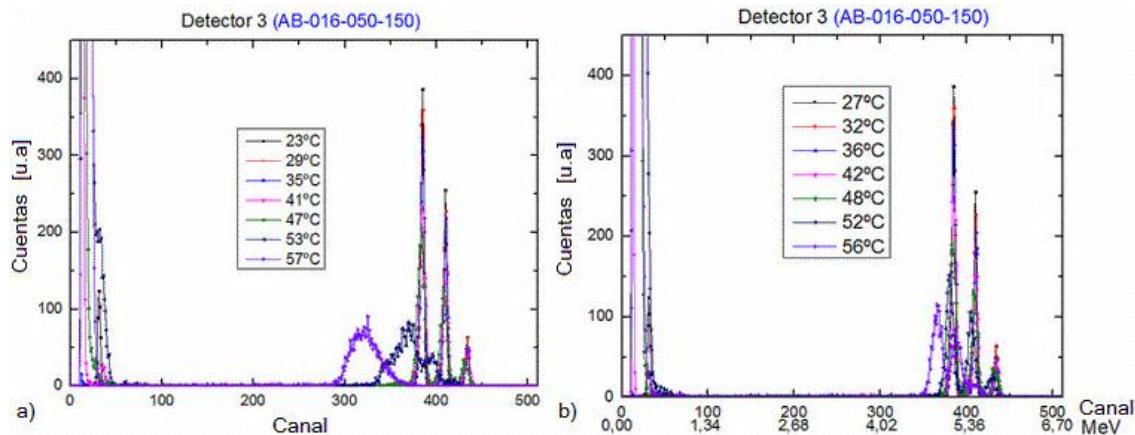


Figura 4.25 - Caracterización térmica del detector AB-016-050-150 tipo AB de 150 μm de espesor, a) incrementando la temperatura (Subida) y b) disminuyendo la temperatura (Bajada).

Se concluye entonces que el comportamiento del detector AB es muy bueno hasta los 47 °C, pero muy malo por encima de los 55 °C. El detector tipo ULTRA mantiene notoriamente una mejor performance al variar la temperatura, con respecto a las series A y B. La intensidad del ruido total a 57 °C resulta 2,4 veces menor respecto al tipo A y 11 veces menor respecto al tipo B, y la energía máxima hasta la cual se extiende el ruido resulta 3,4 veces menor respecto al tipo A, y 2,5 veces menor respecto al tipo B. Considerando que las variaciones estimadas de temperatura, a las cuales estarían sometidos los detectores del instrumento MARE son correctas ($T_{\max} < 40$ °C), cualquiera de ellos tendría un funcionamiento adecuado para el monitor MARE. [36] (Ver Figura 2.24)

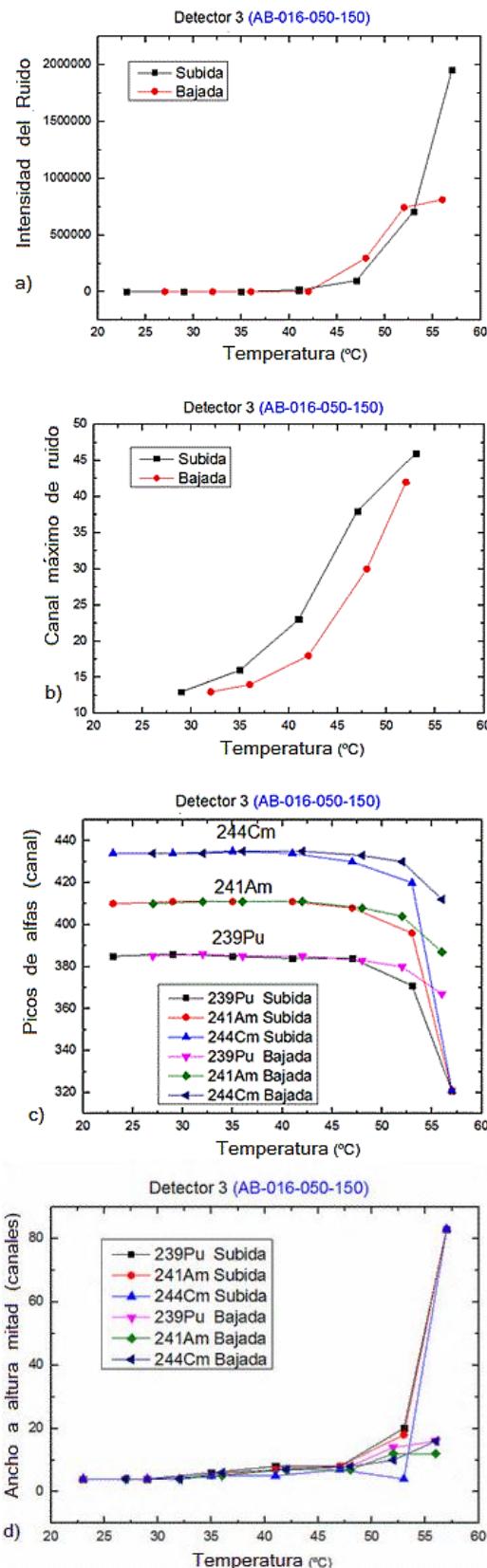


Figura 4.26 - Análisis térmico del detector AB-016-050-150 tipo AB de 150 μm de espesor:
a) Integral del espectro en los canales 1 a 50 asociado al ruido, b) posición del canal máximo asociado al ruido, c) posición de los picos alfas, y d) ancho a mitad de altura (FWHM) de los picos alfas.

CAPÍTULO 5

5 CARACTERIZACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DIGITAL

Para estudiar el desempeño de la electrónica digital del MARE se empleó el prototipo desarrollado por el Ing. Gabriel Bagur, que se presentó en el capítulo 2 de esta tesis (sección 2.3).

Los primeros ensayos se realizaron con dicha placa digital, y uno de los programas desarrollados para la implementación de un multicanal. La idea de este desarrollo, paralelo al desarrollo del MARE, es producir un sistema que pueda ser replicado en el laboratorio para la implementación de la técnica “Espectrometría de partículas dispersadas con detección por tiempo de vuelo”. Esta se conoce en el ámbito de la Física de Superficies y de Interacción de Iones con Superficies como TOF-DRS (Time-of-flight Direct Recoil Spectroscopy) y TOF-ISS (Time-of-flight Ion Scattering Spectroscopy). La misma consiste básicamente en determinar la masa de las partículas dispersadas por un haz incidente de baja energía (\sim keV), midiendo el tiempo de vuelo que tardan éstas en recorrer una distancia conocida. Con este dato, y haciendo uso de las ecuaciones de dispersión en una colisión clásica se puede determinar la relación de masas de los pares colisionantes [65].

El elemento de la electrónica encargado de medir la diferencia temporal entre dos eventos se conoce como TAC (Time to Amplitud Converter). Este módulo entrega un pulso cuadrado con una duración de 2 μ s, y una amplitud (tensión positiva de 0 a 10 V) proporcional a la diferencia de tiempos entre un pulso de disparo (Start) y un pulso de parada (Stop). Este pulso de salida del TAC es el que se quiere medir con la placa digital del MARE.

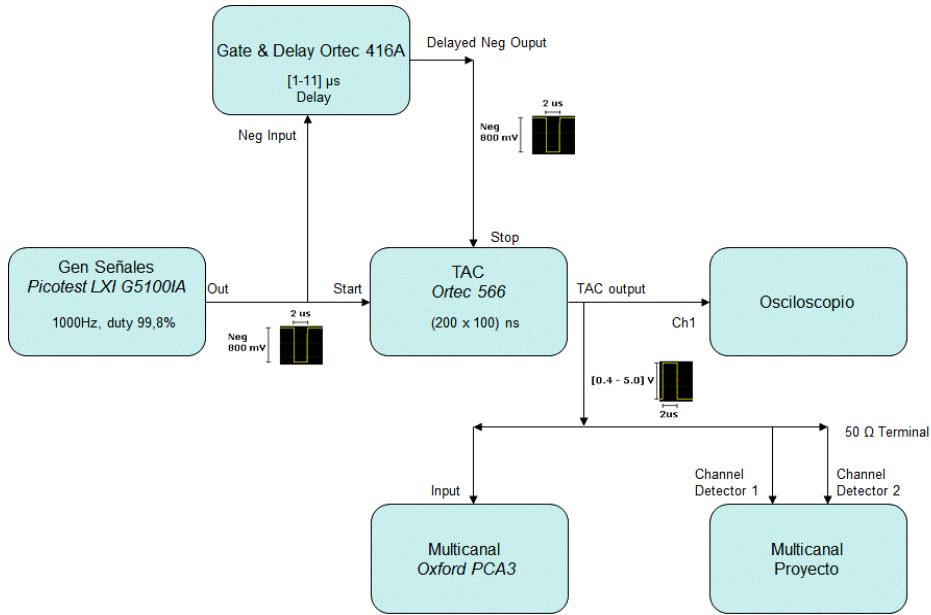


Figura 5.1 - Prueba de la electrónica digital del MARE usando el *projeto multicanal* con pulsos de entrada provenientes de un TAC.

En la Figura 5.1 se presenta el arreglo experimental para la verificación de la electrónica digital del MARE empleando los pulsos provenientes del TAC. Para disparar el TAC se ingresaron pulsos cuadrados y negativos de ancho fijo igual a 2 μ s, con frecuencias variables, y con amplitudes del orden de los 800 mV a la entrada “Start” del TAC, y a la entrada de “Stop” del TAC después de ser retrasados por el módulo Gate&Delay 416 de la empresa Ortec. Variando el tiempo de retraso entre los pulsos con el Gate&Delay, se producen pulsos a la salida del TAC con amplitud variable.

Las mediciones se realizaron variando la amplitud de los pulsos a la salida del TAC con valores de tensión entre 0 y 5 V, a través de un terminal de 50 Ω para evitar pulsos espurios debido a rebotes en la línea de transmisión. Estos pulsos fueron ingresados simultáneamente a un osciloscopio, a un analizador multicanal Oxford PCAIII, y a los dos ADC de la placa digital; obteniendo por cada amplitud del pulso de entrada, la lectura de un determinado canal en los multicanales. En la Figura 5.2 se muestran los espectros adquiridos por la placa digital para un dado valor del pulso de entrada, y en la Figura 5.3 los resultados medidos al variar la amplitud y la frecuencia de los pulsos de entrada.

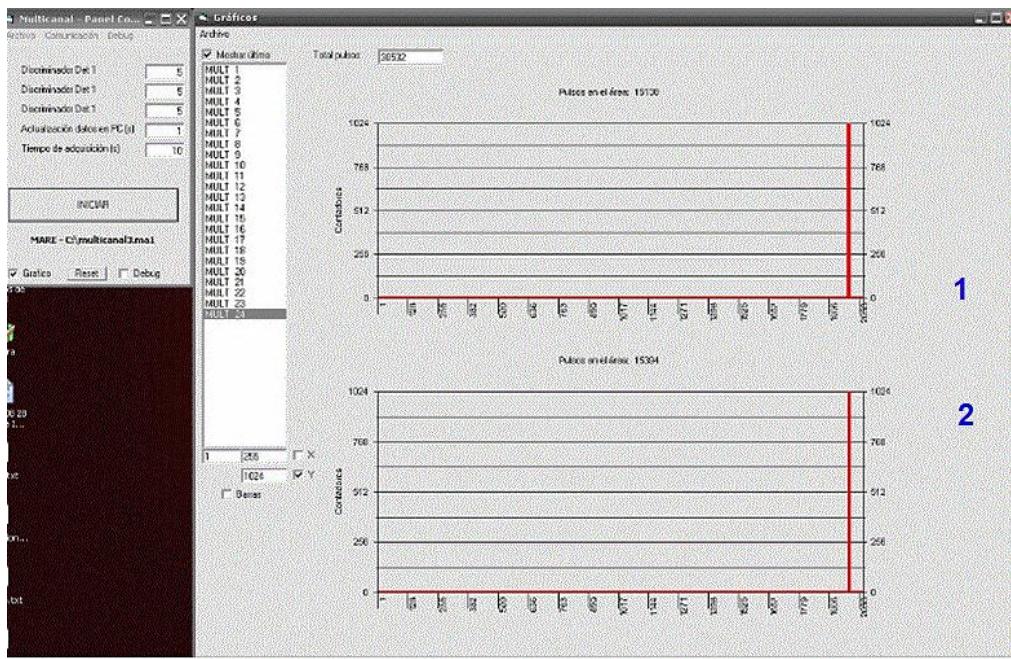


Figura 5.2 Espectros de altura de pulso elaborado con el prototipo de la electrónica digital, empleando el proyecto multicanal y el montaje experimental de la Figura 5.1.

Se observa que la electrónica digital del proyecto multicanal (*Spin-off del proyecto MARE*) tiene una buena respuesta lineal en los dos detectores, con muy poca dispersión en la lectura si se lo compara con el multicanal comercial PCAIII de la empresa Oxford (Figura 5.3.a). Es decir, que el algoritmo sencillo implementado en el MARE para la medición de la altura de un pulso es adecuado.

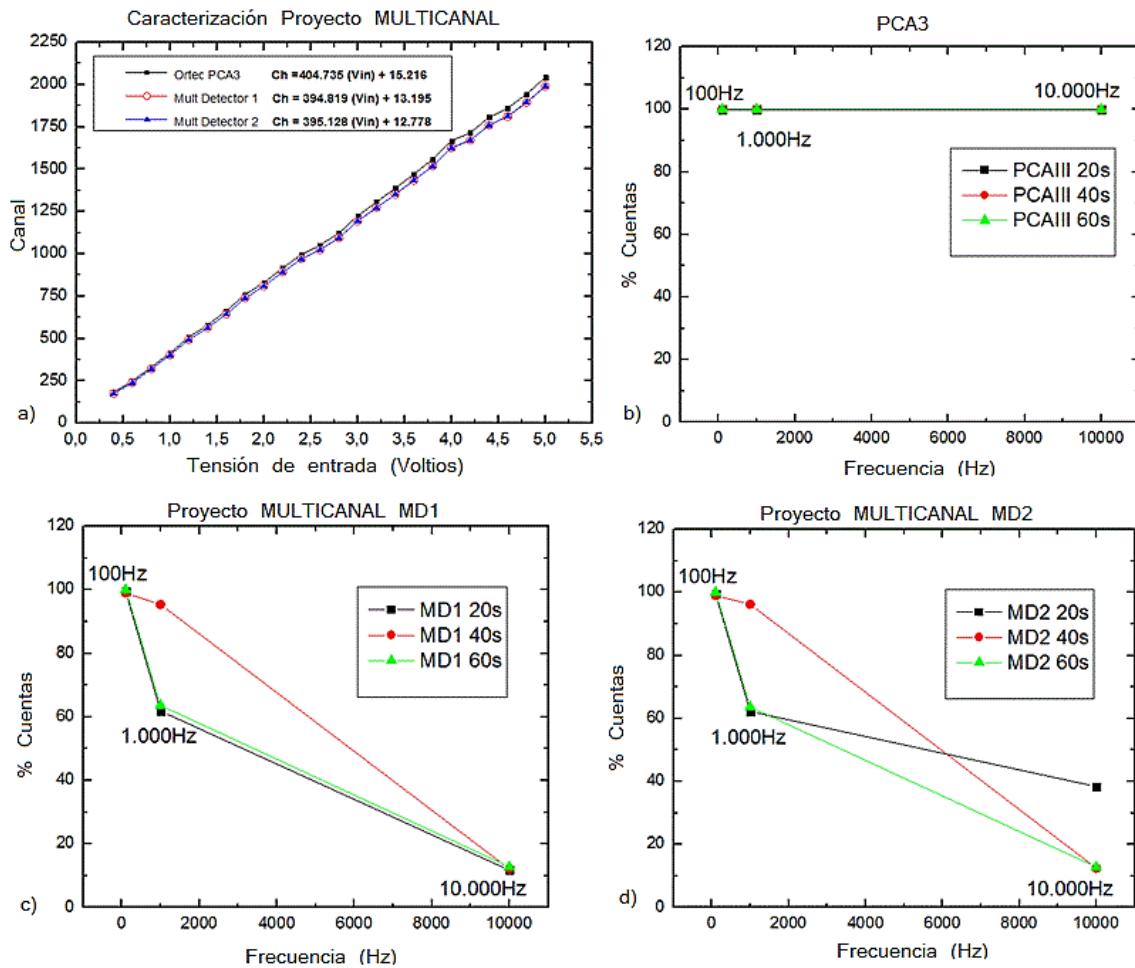


Figura 5.3 a) Respuesta lineal de la electrónica digital del proyecto multicanal. b) Respuesta en frecuencia del MCA Oxford PCAIII (referencia). c) Respuesta en frecuencia del detector 1 del proyecto multicanal. d) Respuesta en frecuencia del detector 2 del proyecto multicanal.

Luego se hizo la caracterización de la respuesta de los pulsos provenientes del TAC variando la frecuencia entre 100 y 10000 Hz. Se observó que el multicanal Oxford PCAIII registra la totalidad de las cuentas para todo el rango de frecuencias (Figura 5.3.b); mientras que los dos canales de detección de la placa digital pierde el 60% de las cuentas a 1000 Hz y casi el 90% a 10000 Hz (Figuras 5.3.c y d).

Esta pérdida de datos es un gran problema en el desarrollo del prototipo de la placa digital por lo que se contactó vía Skype al Ing. Bagur quien desarrolló los programas, y que se encontraba trabajando en el extranjero. Se realizaron distintos ensayos pero no se pudo resolver el problema. Finalmente, luego de mucho tiempo de estudio tratando de entender los códigos programados en la FPGA de la placa digital con 59 bloques de programación

y más de 3356 líneas de código; y el programa de adquisición de la PC escrito en Visual Basic con más de 2000 líneas de programación, se pudo obtener un mayor conocimiento del funcionamiento del proyecto.

Para seguir avanzando y tratar de fijar el problema se recurrió a la ayuda de los ingenieros que desarrollaron la placa digital, con quienes se hicieron numerosas pruebas, detectando problemas en la programación, principalmente en la configuración de la base de tiempos “Timing” de la FPGA, y la forma como el programa en Visual Basic solicita los datos a la FPGA (Empleando la base de tiempos) en Modos Nominal y en Modo Calibración. Finalmente, el 12 de Diciembre, pudieron fijarse algunos de los problemas y se realizaron ensayos con distintos pulsos de entrada provenientes del TAC y de la cadena analógica excitada con fuentes radiactivas y pulsos de test. En la Figura 5.4 se muestran los resultados de la comparación de la respuesta lineal de la electrónica digital del proyecto MARE en Modo Calibración con el multicanal PCAIII, realizada con pulsos provenientes del TAC y de la cadena analógica.

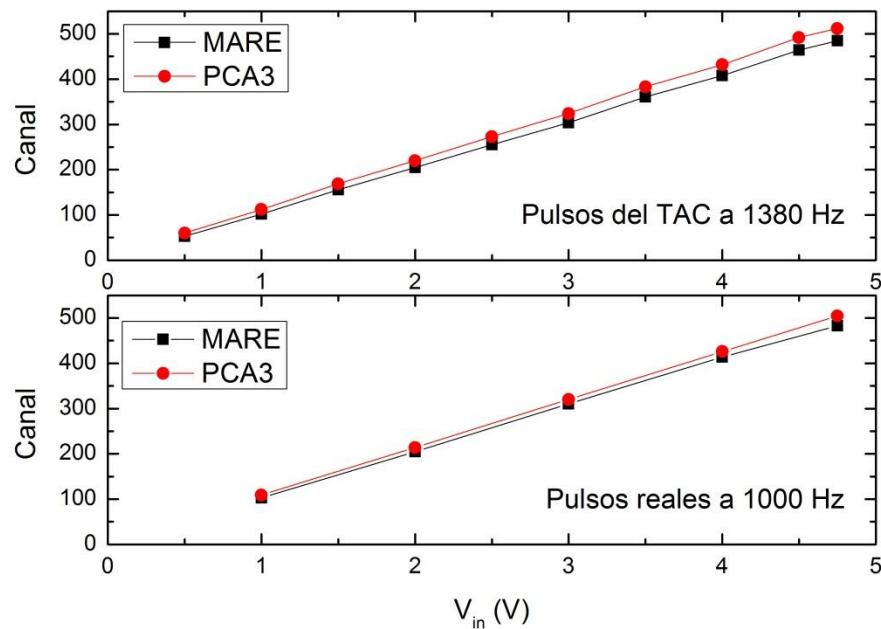


Figura 5.4 Comparación de la respuesta lineal de la electrónica digital del proyecto MARE en Modo Calibración con el multicanal PCAIII, realizada con pulsos provenientes del TAC y de la cadena analógica.

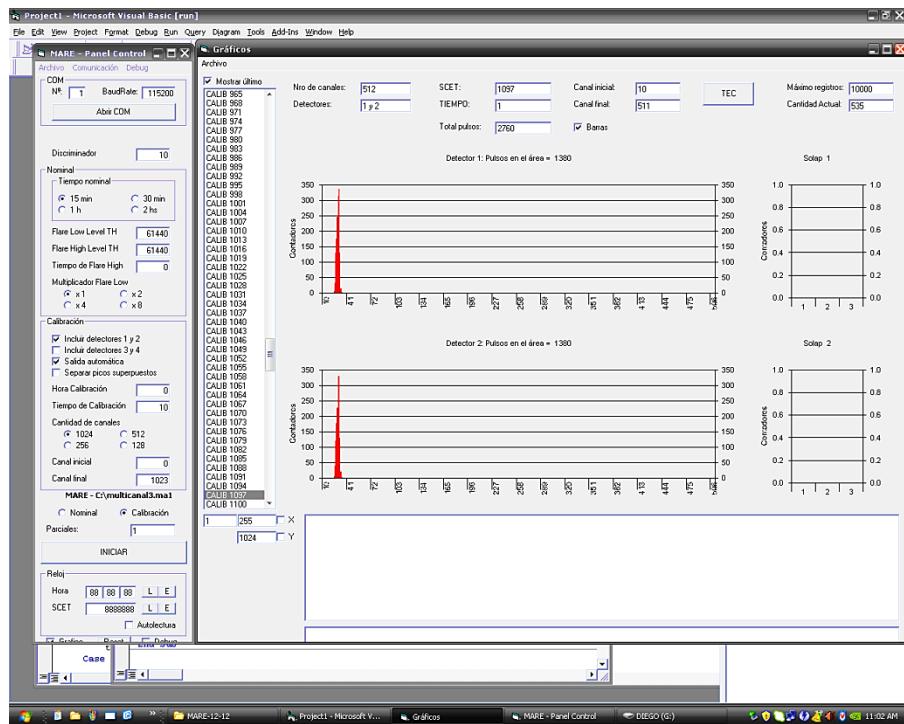


Figura 5.5 Espectros de altura de pulso elaborado con el prototipo de la electrónica digital, empleando el proyecto MARE en Modo Calibración, con pulsos reales provenientes de la cadena analógica excitada con pulsos rápidos negativos a 1380 Hz.

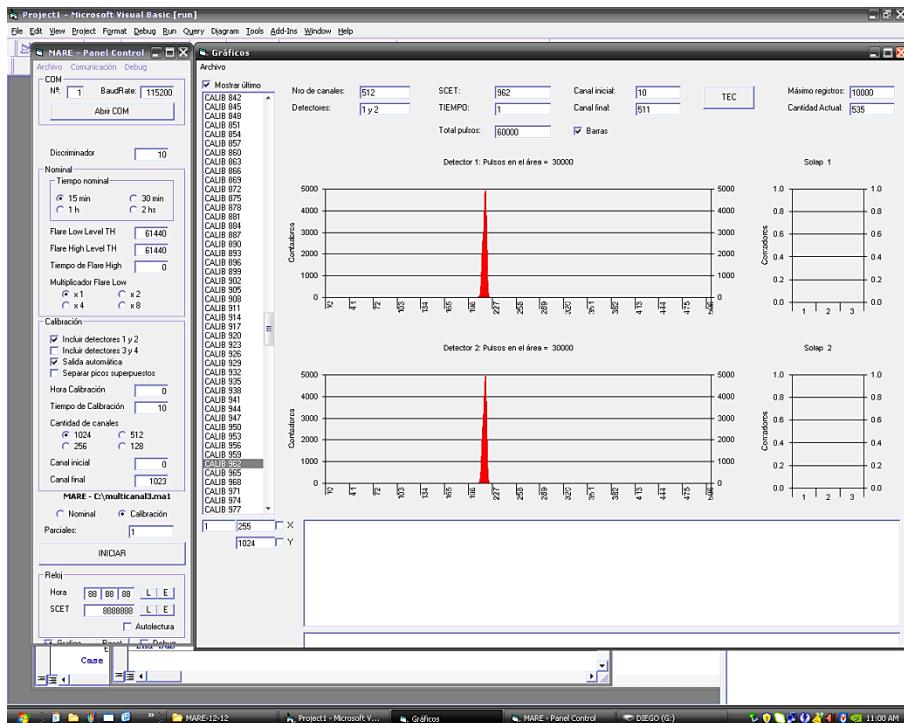


Figura 5.6 Espectros de altura de pulso elaborado con el prototipo de la electrónica digital, empleando el proyecto MARE en Modo Calibración, con pulsos reales provenientes de la cadena analógica excitada con un generador de funciones a 30000 Hz.

En las Figuras 5.5 a 5.7 se muestran los resultados de los espectros medidos por la electrónica digital del MARE en Modo Calibración usando la placa digital excitada con pulsos de test y señales reales provenientes de la detección de partículas alfa. También se realizaron estos ensayos para frecuencias superiores a los 50000 Hz, y en todos los casos se pudo ver que el proyecto MARE media correctamente.

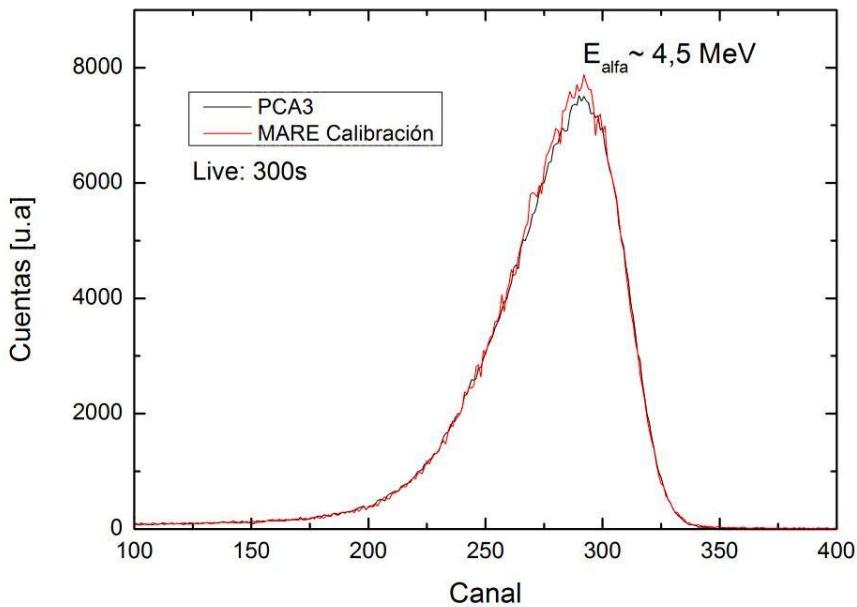


Figura 5.7 Comparación de los espectros de partículas alfas medidos por la electrónica digital del proyecto MARE en Modo Calibración, con el multicanal PCAIII.

La bibliografía más relevante (Libros, pdfs, tutoriales online y páginas web) utilizados para entender la electrónica digital del proyecto MARE, la programación VHDL y la programación en Visual Basic 6, se puede encontrar en la referencia [60].

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSIONES

El Monitor Argentino de Radiación Espacial (MARE) tiene como objetivo medir partículas cargadas (electrones, protones y alfas) cubriendo el amplio espectro de flujos y de energías en condiciones de baja y alta actividad solar; con la posibilidad de seguir midiendo durante las erupciones solares. El mismo está formado principalmente por tres componentes: i) los detectores de radiación, ii) la electrónica analógica de conformación y amplificación de los pulsos generados en los detectores al arribar una partícula, y iii) la electrónica digital que analiza los pulsos, discrimina qué tipo de partícula interactuó con el detector, y los traduce en un espectro de energía que transmite a la computadora de a bordo.

En esta tesis se comenzó estudiando el estado del arte del proyecto tomando como referencia instrumentos similares al MARE. Para esto nos concentraremos en el estudio del ambiente espacial, los materiales empleados en aplicaciones satelitales, blindaje y frenamiento de partículas cargadas con la materia, y el funcionamiento de la electrónica y los detectores de radiación de estado sólido. Finalmente se hizo el estudio sistemático de los distintos parámetros relevantes en el diseño de la electrónica analógica y digital, y de las distintas propuestas de los detectores.

Finalmente se trabajó en la implementación y en los ensayos del monitor, en cada una de sus componentes:

A) En la electrónica analógica se implementó en un prototipo el diseño propuesto para la placa analógica de vuelo, y se la montó en una caja de pruebas. Luego de modificar ciertas componentes para reducir al mínimo el ruido en la electrónica, se verificó que la conformación de pulsos sea la correcta, y que la respuesta de toda la cadena de amplificación fuera lineal. Se comparó el desempeño de dos de las cadenas analógicas propuestas por la empresa AMPTEK para la conformación y amplificación de pulsos de carga

provenientes de la detección de partículas. Se emplearon las cadenas compuestas por los elementos A203+A206 (cadena 1), y la A225F+A275FC+BLR1 (cadena 2).

Se estudió el efecto de apilamiento de pulsos para alta frecuencia de conteo. Se pudo determinar que para el conteo nominal máximo del MARE (50 kHz), en la cadena 1, la contribución al apilamiento de dos pulsos es menor al 2% y el de tres picos es prácticamente despreciable, que el porcentaje de pérdidas de eventos puede llegar hasta el 15%, y que el corrimiento en energía es de 14 keV. Para el caso de la cadena 2, la contribución al apilamiento de dos pulsos es menor al 6% y el de tres picos es prácticamente despreciable, que el porcentaje de pérdidas de eventos puede llegar hasta el 10%, y que el corrimiento en energía no es mayor a 4 keV.

Las pruebas de ciclado térmico entre 25 a 68 °C para la cadena 2, mostraron una disminución lineal en la ganancia total de la cadena analógica con una variación del 3% para 68 °C, sin cambios en la intensidad total de eventos detectados.

Los resultados de estos ensayos indican que la cadena 2, propuesta para vuelo, tiene una mejor performance en el apilamiento (pile-up), ya que si se requiriese una mayor frecuencia de conteo, por ejemplo 100 kHz, la cadena 1 tendría un corrimiento en energía de 30 keV, mientras que la cadena 2 se mantendría por debajo de 6 keV. Un estudio más detallado de la comparación de ambas cadenas debería involucrar simultáneamente el efecto del apilamiento y de la temperatura. Por otro lado, para mejorar la electrónica analógica habría que estudiar en detalle cuál de sus componentes es la responsable del cambio de ganancia con la temperatura.

B) Respecto de los ensayos en los detectores, los mismos se hicieron midiendo con el prototipo de la electrónica analógica de vuelo, espectros de energías provenientes de fuentes radioactivas emisoras de alfas y betas, que se los comparó con espectros calculados.

Se estudió los efectos de incluir láminas delgadas a la entrada de los detectores. Se observó que el espectro de electrones no se afecta para las energías estudiadas (0,14 - 2,3 MeV), y que para partículas alfa su pérdida de energía está de acuerdo con lo estimado para esas láminas.

Se comprobó que el filtro magnético desarrollado para el detector telescopico elimina todo el espectro de electrones con energías de al menos 2,3 MeV, y que deja pasar partículas alfa de 5 MeV. Para completar la caracterización del filtro magnético a bajas energías sería conveniente continuar el estudio de su respuesta a protones con energías mayores de 0,4 MeV.

Por otro lado, se estudió el efecto de la dispersión múltiple en electrones energéticos observándose que los espectros medidos detectan energías mayores a las esperadas si se consideran solo trayectorias lineales. Este efecto es tanto mayor cuanto más grueso es el detector.

Por último, se estudió cómo la temperatura incrementa el ruido y reduce la resolución en energía, mostrando que la performance de los detectores propuestos es adecuada para temperaturas menores a los 40 °C; pero si se requiere trabajar a mayores temperaturas, los implantados son más adecuados que los de barrera de superficie.

C) Finalmente, se comprobó que el estado actual del prototipo de la electrónica digital del proyecto solo permitía realizar contajes de pulsos reales para frecuencias menores a 1 kHz; para frecuencias mayores la pérdida de contaje era muy grande.

El abordaje del problema requirió de una cantidad de tiempo considerable para entender los distintos códigos con más de 5000 líneas de programación. Para esto se recurrió a los ingenieros que desarrollaron la placa digital, con quienes se hicieron numerosas pruebas, detectando problemas en la configuración de la base de tiempos de la FPGA, y cómo el programa que simula la computadora de abordo solicita los datos a la FPGA. Finalmente se realizaron correcciones a estos programas, demostrando que el proyecto MARE es operativo hasta 50000 Hz, funcionando como multicanal en el Modo Calibración, y elaborando

el histograma del espectro en 9 bins para pulsos de entrada provenientes de fuentes reales.

7 AGRACIEMIENTOS

Se agradece el financiamiento del presente proyecto PID 0008-2008 a la Empresa Argentina de Soluciones Satelitales *ARSAT S.A.*, a la Universidad Nacional de Cuyo *UnCuyo*, y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica *ANPCyT*.

Se agradece también a la Comisión Nacional de Energía Atómica *CNEA* por proveer el lugar del trabajo y la Beca de estudios para realizar esta maestría.

De igual manera se agradece al grupo *G.E.M.A.* de la Universidad Nacional de la Plata, y a las empresas *INVAP S.E* y *EMTECH S.A.*, por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] image.gsfc.nasa.gov/poetry/tour/vanallen.html
- [2] Radio volumétrico medio terrestre: 6371 Km,
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- [3] Velocidad angular terrestre $(7.2921150 \pm 0.0000001) \times 10^{-5}$ rad/s, Aoki, et al., *The new definition of Universal Time*, Astronomy and Astrophysics 105(1982) 359-361.
- [4] J. Chen, and D. A. Garren, *Interplanetary magnetic clouds: Topology and driving mechanism*, Geophys. Res. Lett., 20, 2319, 1993.
- [5] http://www.srl.caltech.edu/personnel/dick/cos_encyc.html
- [6] <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/sun/corona.html>
- [7] <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/flare.htm>
- [8] Geostationary Operational Environmental Satellites, <http://www.ngdc.noaa.gov>,
<http://www.sec.noaa.gov>
- [9] http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_plots/special/ExtremeEvent_20031026-00h_20031106-24h.jpg
- [10] E.A. Sánchez, A. Tartaglione. *MARE Detectors*, ACTA MARE 04-01-CDR, (2010), comunicación privada.

-
- [11] E.A. Sánchez, A. Trataglione, G. Lantschner, R. Mayer, E. Sauro, J. DePellegrin, M. Famá, y P. Fainstein, “*Monitor Argentino de Radiación Espacial (MARE) 1: CONSIDERACIONES GENERALES Y DISEÑO DE DETECTORES*”, Libro de actas del VI Congreso Argentino de Tecnología Espacial, La Punta, San Luis, 18 al 20 de Mayo 2011. Sección I-Comunicaciones y Telemetría: I2.pdf.A.
- [12] A. Tartaglione, E.A. Sánchez, “*Cálculos de Ambiente Espacial y Dosimetría para el diseño del Monitor Argentino de Radiación Espacial (MARE)*”, Libro de actas del VI Congreso Argentino de Tecnología Espacial, La Punta, San Luis (2011). Sección I-Comunicaciones y Telemetría: I1.pdf.
- [13] National Oceanographic and Atmospheric Agency : <http://www.swpc.noaa.gov/>
- [14] AR-SAT: Empresa Argentina de Soluciones Satelitales S.A. www.arsat.com.ar
- [15] INVAP S.E.: <http://www.invap.com.ar/>
- [16] <http://www.invap.com.ar/es/proyectos/satelite-arsat.html>, <http://www.arsat.com.ar/satellites-y-orbitas>.
- [17] http://craterre.onecert.fr/radiation_monitors/ICARE.html
- [18] <http://www.conae.gov.ar/satellites/sac-c.html>,
<http://www.invap.com.ar/es/area-aeroespacial-y-gobierno/proyectos/satelite-sac-c.html>
- [19] F. Bezerra, E. Lorfevre, R. Ecoffet (CNES), D. Flaguére (ONERA), P. Bourdoux (EREAMS), “*CARMEN2/MEX - First Set of In-Flight Data*”, CNES/ESA Final Presentations Day- January 28th 2009:1234857126532203_QCA_CNES_FPD2009_CARMEN2MEX.pdf.
<http://smsc.cnes.fr/JASON2/>
- [20] <http://www.mincyt.gob.ar/casos-modelo/sac-d-aquarius-el-satelite-argentino-4910>
- [21] B. K. Dichter, J. O. McGarity, M. R. Oberhardt, V. T. Jordanov, D. J. Sperry, A. C. Huber, J. A. Pantazis, E. G. Mullen, G. Ginet and M. S. Gussenhoven, *Compact Environmental Anomaly Sensor (CEASE): A Novel Spacecraft Instrument for In Situ Measurements of Environmental Conditions*, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 45, NO. 6 (1998).
- [22] <http://www.amptek.com/cease.html>.
- [23] <http://www.amptek.com/projects.html#hep#hep>
- [24] R.H. Redus, B.K. Dichter, M.R. Oberhardt, J.O. McGarity, J. Dalcolmo, S. Woolf, A.C. Huber, J.A. Pantazis, *Design, Development, and Calibration of a High Energy Proton Telescope for Space Radiation Studies*, Nucl. Inst. Meth. A 482 p. 281-296 (2002).
- [25] P. Bühler, S. Ljungfelt, M. Mcchedlishvili, N. Schlumpf, A. Zehnder, L. Adams, E. Daly, and R. Nickson, *Radiation Environment Monitor*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 386, 825 (1996).
- [26] A. Tartaglione, E.A. Sánchez. *MARE Space Weather and Related Effects*, ACTA MARE 04-02-CDR, (2010), comunicación privada.
- [27] E. Sauro, *MARE Analog Electronics*, ACTA MARE 04-03-CDR, (2010), comunicación privada.
- [28] G. Bagur, *MARE Digital Electronics and communication*, ACTA MARE 04-04-CDR, (2010), comunicación privada.

-
- [29] O. Anticura, *MARE Connections and grounding*, ACTA MARE 04-05-CDR, (2010), comunicación privada.
- [30] R.E Mayer, *MARE OPERATING CONDITIONS*, ACTA MARE 04-06-CDR, (2010), comunicación privada.
- [31] E.A. Sánchez, *DETECTOR MAGNETIC FILTER TEST*, ACTA MARE 04-09-01-CDR, (2010), comunicación privada.
- [32] A. Tartaglione, E.A. Sánchez, *MARE THERMAL TESTS*, ACTA MARE 04-09-02-CDR, (2010), comunicación privada.
- [33] O. Grizzi, *MARE List of Parts and Budget*, ACTA MARE 05-01-CDR, (2010), comunicación privada.
- [34] UID GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería UNLP, *Diseño estructural del Monitor Argentino de Radiación Espacial MARE* ACTA MARE 04-08/03-CDR, (2010), comunicación privada.
- [35] UID GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería UNLP, *Análisis detallado para condiciones de vuelo nominal de las placas electrónicas y DC-DC del instrumento MARE* ACTA MARE 04-08/01-CDR, (2010), comunicación privada.
- [36] UID GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería UNLP, *Análisis detallado de temperaturas del instrumento MARE* ACTA MARE 04-08/02-CDR, (2010), comunicación privada.
- [37] ANTICURA, O. - ASCOLANI YAEL, J. - BAGUR, G. - De PELLEGRIN, J. - FAINSTEIN, P - FAMÁ, M. - GRIZZI, O. - LANTSCHNER, G. - MAYER, R. - SALAZAR ALARCON, D. - SANCHEZ, E. A. - SAURO, E. - TARTAGLIONE, A., “*Proyecto de desarrollo del Monitor Argentino de Radiación Espacial MARE*”, Libro de actas del VI Encuentro Sudamericano de Colisiones Inelásticas en la Materia, Rosario, Santa Fe, 19 de noviembre al 1 de diciembre de (2012).
- [38] Lecture 3, *Accelerated Charge and Bremsstrahlung*, <http://www.astro.utu.fi/~cflynn/astroll/l3.html>, Fabian et. al., Astrophysical Journal, 248, 47, (1981).
<http://adsabs.harvard.edu/full/seri/ApJ..0248/0000047.000.html>
- [39] Cerenkov Effect :
http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/hst2002/bubblech/mbitu/cerenkov_effect.htm
- [40] <http://beam.acclab.helsinki.fi/~knordlun/mdh/rangetext.html>, W. E. Burcham. *Elements of nuclear physics*. Longman, London and New York, (1979).
- [41] *Producing neutrons - the spallation reaction*, Paul Scherrer Institute, Principle of spallation reaction, <http://www.psi.ch/media/the-sinq-neutron-source>.
- [42] <http://beam.acclab.helsinki.fi/~knordlun/mdh/rangetext.html>, J. Lindhard, M. Scharff, and H. E. Shiltt. *Range concepts and heavy ion ranges*. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 33(14):1, (1963).
- [43] National Institute of Standards and Technology, <http://www.nist.gov>.
- [44] *Operation and Characteristics of a Semiconductor Detector I, The Silicon Surface Barrier Detector*, <http://livingtextbook.oregonstate.edu/chemlab/media/expt6.pdf>

-
- [45] Han Soo Kim, Se Hwan Park and Jang Ho Ha, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Seung Yeon Cho Department of Environmental Engineering, Yonsei University, Wonju 220-710, Yong Kyun Kim, Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, *Characteristics of Silicon Surface Barrier Radiation Detectors for Alpha Particle Detection* (2008).
- [46] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, (John Wiley and Sons, New York), (1993), p. 354.
- [47] R. E. Mayer, "Detectores Semiconductores", Capítulo 5, Curso Detección de Radiación, Instituto Balseiro, (2013): Cap5_Semicond.pdf.
- [49] <http://www.ortec-online.com/Solutions/RadiationDetectors/index.aspx>.
- [48] D.L Yelós, E. Sauro, E. A. Sánchez, *Caracterización de la electrónica de detección para el detector de radiaciones espaciales MARE*, Centro Atómico Bariloche-CNEA, Instituto Balseiro-UNCuyo, Informe de beca de Verano (2010).
- [50] www.amptek.com/a225.html
- [51] www.amptek.com/a275.html
- [52] <http://www.amptek.com/blr1.html>
- [53] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, (John Wiley and Sons, New York), (1993), p 598.
- [54] <http://www.amptek.com/hybrids.html>.
- [55] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, (John Wiley and Sons, New York), p. 587, 588, 596, 597, 627, 658, (1993).
- [56] pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1167/ONSEMI/LM337.html
- [57] <http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/256659/NSC/LM117HVQML.html>
- [58] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD1671S.pdf
- [59] <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3224-MAX3245.pdf>
- [60] * P.P. Chu, *FPGA PROTOTYPING BY VHDL EXAMPLES*, Cleveland State University, 3 Version, 2008.
* M. Bryan, F. Tappero, *FREE RANGE VHDL*, (2011).
Stephen Brown, Zvoko Vranesic, *Fundamentals of Digital Logic with VHDL Design*, University of Toronto, Department of Electrical and Computer Engineering, Second Edition, (2005),
* E. Savas, *VHDL Basic I/O*, Sabanci University.
* Synario Design Automation, *VHDL Reference Manual*, Microsoft Corporation, (1997).
* Doulos, *The VHDL Golden Reference Guide*, United Kingdom of Great Britain, Version 1.1, (1995).
* P.J. Ashenden, *The VHDL Cookbook*, University of Adelaide, Dept. Computer Science, South Australia, First Edition, (1990).
* P.J. Ashenden, *VHDL Tutorial*, EDA Consultant, Ashenden Designs PTY.LTD, Elsevier Science (USA), (2004).
* IC Design Research Lab, *VHDL*, FCU, Department of ECE.

-
- * [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa232743\(v=vs.60\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa232743(v=vs.60).aspx)
 - * http://www.thalio.com/prog-cgi/0002_serial.htm
 - * <http://www.emtech.com.ar>
- [61] <http://www.ortec-online.com/download/introduction-charged-particle-detectors.pdf&prev=/search%3Fq%3DOrtec%2Bintroduction%2Bto%2Bcharged%2Bparticle%2Bdetectors.pdf>
- [62] W G Cross, H Ing and N Freedman, *A short atlas of beta-ray spectra*, Atomic Energy of Canada Research Company, Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0, Phys. Med. Biol., Vol. 28, No. 11, 1251-1260 (1983).
- [63] A.A. Kriss, D.M. Hamby, *Beta spectroscopy with a large-area avalanche photodiode module and a plastic scintillator*, Department of Nuclear Engineering and Radiation Health Physics, Oregon State University, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 525 (2004) 553-339.
- [64] http://www.astrokettle.com/p_beam.html
- [65] J.E. Gayone, *Espectroscopía de iones aplicada al estudio de la adsorción de hidrógeno y potasio en arseniuro de galio 110*, Instituto Balseiro, (2000).