



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL
SISTEMA DE DIGITALIZACIÓN FEBEX3 DEL
ARREGLO DE DETECCIÓN SIMAS PARA
EXPERIMENTOS DE REACCIONES NUCLEARES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Físico

PRESENTA:

Luis Roberto Ríos Álvarez

TUTOR

Dr. Luis Armando Acosta Sánchez





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del Jurado

1.- Datos del alumno

Ríos

Álvarez

Luis Roberto

88 68 15 92

Universidad Nacional Autónoma
de México

Facultad de Ciencias

Física

413101576

2.- Datos del tutor

Dr.

Luis Armando

Acosta

Sánchez

3.- Datos sinodal 1

Dr.

Alexis Armando

Aguilar

Arévalo

4.- Datos sinodal 2

Dra.

Libertad

Barrón

Palos

5.- Datos sinodal 3

Fís.

Arcadio

Huerta

Hernández

6.- Datos sinodal 4

Dra.

Paulina

Amador

Valenzuela

7.- Datos del trabajo escrito

Título: Caracterización y puesta a punto del sistema de digitalización FEBEX3 del arreglo de detección SIMAS para experimentos de reacciones nucleares.

No. de páginas: 91

Año: 2021

Agradecimientos Profesionales

A las personas que conforman parte del jurado. Dr. Alexis Armando Aguilar Arévalo, Dra. Libertad Barrón Palos, Fís. Arcadio Huerta Hernández y Dra. Paulina Amador Valenzuela agradezco por su disposición a colaborar con esta tesis y por sus observaciones que fueron de vital importancia para la calidad de este trabajo.

En particular al Dr. Luis Armando Acosta Sánchez por su infinita paciencia y apoyo durante mi servicio social, tesis y todos los proyectos que aparecieron en el camino. Agradezco de sobremanera todo el apoyo, observaciones, cuidado e interés por mi salud y sobretodo comprensión durante estos años, gracias a él he crecido tanto en el ámbito personal como profesional.

Al Dr. Nicolaus Kurz por el apoyo esencial que brindó para lograr este proyecto con su estancia y colaboración a distancia.

Al Dr. Christian Alfonso Valerio Lizárraga por su colaboración en este trabajo y su invitación para realizar una estancia en Culiacán, su apoyo al inicio fue de vital importancia y al Lic. Gaspar Ricardo Montoya Soto que me recibió durante la estancia con los brazos abiertos y me apoyo en todo lo que necesité.

Al Dr. Efraín Rafael Chávez Lomelí y al Dr. Oscar Genaro De Lucio Morales por su disposición y apoyo en este proyecto desde el momento del servicio social en adelante.

A la M. en C. Karen Patricia Gaitán de los Ríos por su apoyo en la revisión de este trabajo, sus observaciones ayudaron a hacer de este un trabajo profesional.

A todos los estudiantes, al Fís. Arcadio Huerta, operador del acelerador y personal del Instituto de Física que de una manera u otra se vieron relacionados con este trabajo y brindaron su apoyo e interés.

A los proyectos DGAPA-UNAM IN107820, AG101120 y CONACyT 314857.

Agradecimientos Personales

Agradezco primero a mis padres Claudia y Roberto que me apoyaron dándome los mejores estudios a su disposición, cariño, interés y comprensión. Es gracias a ellos que estoy aquí, me formaron como persona y me apoyaron siempre.

A mi familia que me dio todo al inicio de mis estudios, es por ellos que pude hacer lo que amo. Principalmente agradezco a mis dos abuelas Carmen y mi abuelo Rafael, mi tía Tere y mi tío Pedro, mi tío Rafael y mi tía América por apoyarme de sobremanera con lo que fuera necesario.

A todas mis maestras del colegio Ecab y particularmente a Miss Lulú por enseñarme el valor de la ciencia y darme las bases para tener una carrera exitosa y el valor para tomar esa decisión.

A Tadeo y Axl mis amigos más cercanos, por estar ahí para escucharme y apoyarme en todo lo que les fuera posible. Es en gran parte por su apoyo que he logrado crecer como persona y llegar hasta donde estoy hoy.

Y finalmente a mi prima Pao por hacer el esfuerzo de darme mi primer libreta en la carrera.

Índice general

Datos del Jurado	III
Agradecimientos Profesionales	V
Agradecimientos Personales	VII
Resumen	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos	4
1.1.1. De investigación	4
1.1.2. Experimentales	4
1.2. Optimización de la óptica de haz para un sistema de detección de partículas	4
1.2.1. Marco teórico para la óptica de haces de partículas.	5
1.3. Línea de haz y componentes ópticos del CN-Van de Graaff de 5.5 MeV del laboratorio Carlos Graef Fernández IF-UNAM	6
1.4. Software de simulación de transporte de haz en aceleradores	7
1.4.1. MAD-X	7
1.4.2. TRAVEL	8
1.5. Sistemas de detección de partículas cargadas	8
1.5.1. Semiconductores de Silicio	8
1.5.2. Propiedades	10
1.5.3. Producción de partículas Alfa	11
1.5.4. Detector DSSSD	15
1.6. Sistema de adquisición de datos	17
1.6.1. Introducción	17
1.6.2. Sistema FEBEX3	19
1.6.3. Software de monitorización de datos Go4	23

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
2.1. Procedimiento experimental	27
2.1.1. Procedimiento experimental	27
2.1.2. Montaje del dispositivo experimental: detector, lectura y digitalización	38
2.1.3. Pruebas de vacío	43
2.1.4. Sistema de detección de partículas Alfa	43
2.1.5. Detección de un haz de partículas	44
2.1.6. Análisis experimental	44
2.1.7. Determinación de Resoluciones Energéticas	46
2.1.8. Cálculo de la sección eficaz diferencial de Rutherford	47
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1. El DSSSD utilizado para determinar la posición de una fuente	57
3.2. Comparación de las resoluciones obtenidas	59
4. CONSTRUCCIÓN DEL MANUAL DE USUARIO	61
5. CONCLUSIONES	71
Índice de figuras	86
Referencias	86

Resumen

El objetivo de esta tesis se basa en la caracterización y puesta a punto del sistema de adquisición de datos para el arreglo de detección SIMAS (Sistema Móvil de Alta Segmentación), un sistema a ser utilizado en experimentos de dispersión elástica y reacciones nucleares en aceleradores de partículas en México y otros laboratorios internacionales. Dada la alta segmentación en canales del arreglo experimental, FEBEX3 es una respuesta idónea para el procesamiento y lectura de datos. A diferencia de los estándares en sistemas de adquisición existentes (CAMAC y VME), FEBEX3 cuenta con una infraestructura propia y compacta, presentando además digitalización directa (sin necesidad de pasar por un amplificador de corriente/carga), lo que disminuye la densidad de dispositivos electrónicos [26, 32, 33].

FEBEX3 está constituido por un transcriptor de señales analógicas a señales digitales, con el propósito de facilitar su procesamiento y hacer la señal resultante más clara, al ser menos susceptible al ruido y a otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas. Este sofisticado tipo de conversor usa un método de “tubería” en el que convierte la señal analógica a digital y luego la regresa a analógica para encontrar errores en la conversión y así afinar la digitalización con un sintetizador de frecuencias, el cual crea un ciclo cerrado que compara las fases de las dos señales entrantes y produce una señal de filtro, de forma tal, que la señal de salida final se muestra mucho más limpia que aquella observada por los sistemas estándar.

FEBEX3 fue diseñado para auxiliar a los nuevos sistemas de adquisición que están bajo desarrollo para el nuevo laboratorio FAIR, de Darmstadt, Alemania [34]. Al tratarse de un sistema prototipo, debe ser caracterizado para su uso con detectores de partículas cargadas de alta segmentación. Actualmente el Instituto de Física de la UNAM cuenta con 128 canales FEBEX3 de digitalización, para ser caracterizados utilizando un detector de silicio de 16x16 micro-tiras de doble cara.

Se caracterizaron 32 de los 128 canales del sistema FEBEX3, para uno de los detectores segmentados del sistema SIMAS, utilizando señales artificiales, señales producidas por una fuente triple alfa y las señales de un haz de protones en interacción con un blanco de dispersión de oro. Con ello se busca obtener los parámetros de salida en resolución de energía, resolución angular, resolución temporal y los límites máximos y mínimos de ganancia, de acuerdo con la electrónica analógica asociada al arreglo

de detección, además de establecer los parámetros óptimos para la creación de la señal de disparo que gobernará al sistema.

Dadas las características para las cuales se utilizará el sistema SIMAS, relacionada con la detección de partículas en aceleradores, la caracterización partió desde cero: esto es, la línea de haz se caracterizó también para optimizar los parámetros ópticos de transmisión de haz. Se realizó el montaje de la cámara de reacción, la alineación y pruebas de vacío, para después proceder al montaje de detectores, cadena electrónica y, finalmente, el sistema de adquisición a caracterizar. Con esto, el presente trabajo se puede considerar como un manual de procedimiento desde “cero” para la realización de un experimento en física nuclear, en las actuales líneas experimentales de los aceleradores de bajas energías mexicanos, y por supuesto, el protocolo se puede extender a otros sistemas similares en el mundo.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La física nuclear es una rama de la física que se encarga de estudiar la estructura fundamental de la materia y las interacciones entre partículas subatómicas. En este trabajo, se hace uso de interacciones entre partículas ligeras y blancos pesados con el fin de analizar la respuesta de integración y digitalización de una cadena electrónica en combinación con un sistema de adquisición de datos de frontera. El sistema se probó también con señales de pulsos y con una fuente radioactiva.

Es en la desintegración de núcleos inestables cuando distintos tipos de partículas son emitidas y es entonces de interés para la ciencia estudiar la manera en la que éstas interactúan con la materia. La idea de generar detectores de partículas surge del deseo de Rees Wilson en 1895 de estudiar la descarga de electricidad en una nube de gases usando una cámara libre de polvo llena de vapor de agua saturado. Por supuesto desde tiempo atrás, existían maneras de detectar partículas, pero es hasta esta fecha cuando se inicia el desarrollo de instrumentación especializada para estudiar las partículas conocidas y de manera casi natural, descubrir nuevas [35].

Para poder detectar una partícula, ésta tiene que producir algún tipo de interacción con el material del que está hecho el detector, generalmente relacionada con la carga asociada a la partícula. De dicha interacción se produce una señal, la cual es procesada de manera analógica y digital para obtener información de la interacción. Siendo el caso de que las partículas tengan carga neutra, éstas deben transferir su energía a partículas cargadas para ser medidas [29].

El punto central de este trabajo, se refiere a la caracterización del sistema de adquisición de datos FEBEX3, el cual es un sistema de digitalización desarrollado en el Centro de Investigación de Iones Pesados en Alemania (GSI por sus siglas en alemán) que nos permite digitalizar un pulso sin necesidad de un amplificador y, por su manera de filtrar la información, permite trabajar en un ambiente con ruido, pudiendo así detectar y medir pulsos de muy baja amplitud. Se puede programar para trabajar con señales positivas o negativas y su interfaz está diseñada para trabajar con el sistema de adquisición de datos MBS

(Multi Branch System) [26].

1.1. Objetivos

Los objetivos planteados para el desarrollo de la tesis se enfocan tanto en un marco teórico como en pruebas experimentales, a continuación se enuncian.

1.1.1. De investigación

Caracterizar y realizar una puesta a punto del sistema de adquisición de datos para el arreglo de detección SIMAS (Sistema Móvil de Alta Segmentación), sistema que será utilizado en experimentos de dispersión elástica y reacciones nucleares en aceleradores de partículas en México y otros laboratorios internacionales.

1.1.2. Experimentales

Poner en funcionamiento el sistema de digitalización FEBEX3 a partir de pruebas con un detector DSSSD (Double Sided Silicon Strip Detector), partiendo desde la optimización de la línea central de haz del acelerador Van de Graff de 5.5 MV del Laboratorio Carlos Graef del IFUNAM, en la cual se realiza el montaje del dispositivo experimental para la caracterización de todo el sistema (línea de haz, cámara de reacción, sistema de detección, cadena electrónica y sistema de adquisición de datos). En este trabajo, se realiza entonces el análisis de la información proporcionada por el sistema de adquisición de datos, utilizando como emisor, una fuente triple alfa.

La caracterización se realiza así desde cero, dado que es la primera vez en la que tanto el sistema de detección, como la cadena electrónica y el sistema de adquisición de datos, se utilizan en México.

1.2. Optimización de la óptica de haz para un sistema de detección de partículas

Como se mencionó en la parte introductoria, este trabajo parte desde cero. Con esto se quiere decir que se considera como punto inicial la optimización de la línea de haz, para con ello tener la mayor emitancia del flujo de partículas en el punto de dispersión. A pesar de que las pruebas aquí realizadas no contemplan un haz de partículas, la optimización de los componentes de la línea se realizó de manera teórica. Los cálculos aquí mostrados serán de suma utilidad en el momento en el que puedan realizarse pruebas y medidas experimentales con haces de partículas.

1.2.1. Marco teórico para la óptica de haces de partículas.

Un haz viaja a través de una línea y es de interés controlar sus dimensiones ya que si el tamaño del haz es superior al de la línea se perderá una parte de éste. Las variables que controlan esto son la emitancia, que es una medida del volumen de un haz en el espacio fase dada la posición y momento de las partículas que lo componen y los parámetros Twiss que determinan la posición y el ángulo de cada partícula de dado haz en el mismo espacio fase. Para poder atacar su estudio se puede empezar por definir un radio “x” y uno “y” para generalizar y verlo con forma elíptica [19, 20].

La ecuación que rige las dimensiones de los radios es la siguiente:

$$\sigma_i = \sqrt{\varepsilon\beta_i} \quad (1)$$

Donde la ε representa la emitancia que determina si las partículas viajan de manera paralela respecto a las demás (a mayor emitancia más rápido diverge el haz) si se le deja viajar en línea recta, y la β , es la función geométrica que determina la amplitud que tendrá el haz de partículas durante su transporte, debido a que el tamaño del haz cambia al interactuar con un campo magnético. El subíndice i en la β señala el eje sobre el que se define este parámetro y s es la posición desde la que se observa una partícula (ver Fig. 1.1).

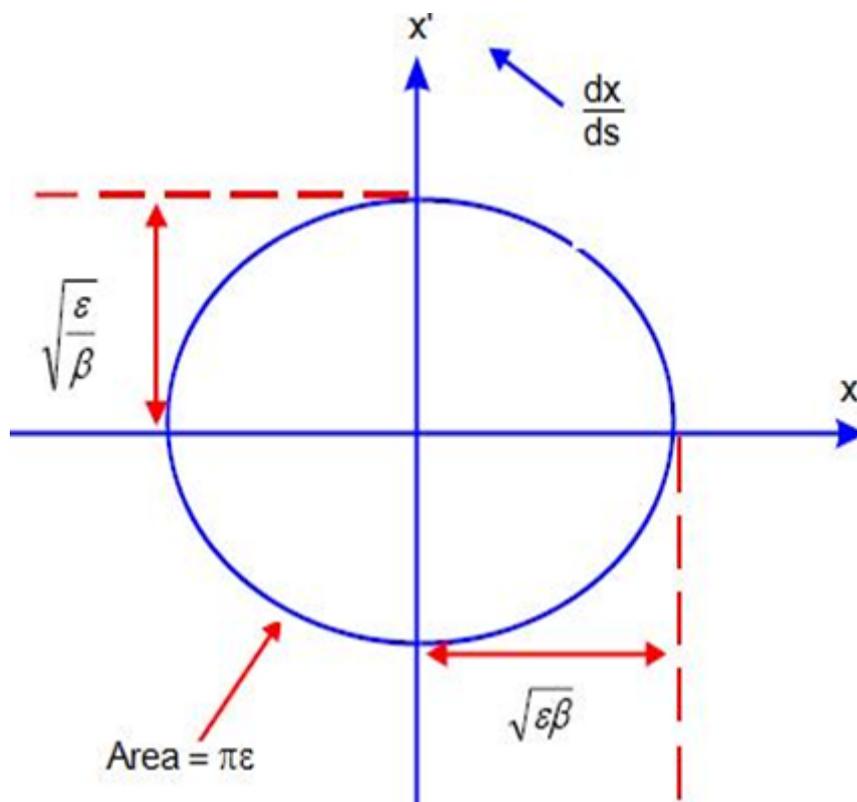


Figura 1.1: Área de la elipse de un haz de partículas en el espacio fase en función al parámetro Twiss β [21].

Además, el transporte de haz se puede aproximar por la ecuación:

$$\frac{d^2r}{dz^2} + k_0^2 r - \frac{\epsilon^2}{r^3} - \frac{K}{r} = 0 \quad (2)$$

Donde z es el eje de profundidad, r es el radio del haz de partículas, k_0^2 , es la fuerza de enfoque de los magnetos o imanes y K , es el término de la fuerza de repulsión de Coulomb. Sin embargo, en este trabajo sólo se tomó en consideración la ecuación (1) que describe los radios del haz pues sólo interesa que el tamaño de éste se mantenga menor que el tubo por el que viaja [2].

1.3. Línea de haz y componentes ópticos del CN-Van de Graaff de 5.5 MeV del laboratorio Carlos Graef Fernández IF-UNAM

El acelerador CN-Van de Graaff de 5.5 MeV del IF-UNAM es un acelerador de tipo electrostático capaz de acelerar iones hasta energías de 5.5 MeV, este fue obtenido mediante una donación de la universidad W.M. Rice (Houston, TX) en 1985 y el IFUNAM terminó su instalación en 1988. La línea de aceleración cuenta con un sextupolo que actualmente no se encuentra en funcionamiento, seguido de un dipolo que dobla el haz 90° , después un doblete de cuadrupolos con campos positivo y negativo que enfocan el haz hacia un seleccionador que es un dipolo que puede doblar el haz 45° para dirigirlo a una línea con otro par de cuadrupolos o no tener efecto sobre el haz para que siga por una línea alterna que no tiene más imanes [6].

El diagrama esquemático de la Fig. 1.2, muestra los componentes de la línea de haz en cuestión.

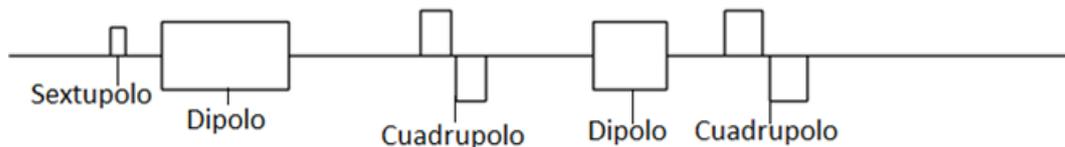


Figura 1.2: Diagrama unidimensional del acelerador del Instituto de Física [6].

En la Fig. 1.3 se muestra el dipolo principal de deflexión de haz, de la línea central del acelerador, mientras que en la Fig. 1.4 pueden verse las diversas líneas del acelerador que son elegidas con un imán selector. Los cálculos mostrados en este trabajo se realizaron para la línea central o línea a 0° .

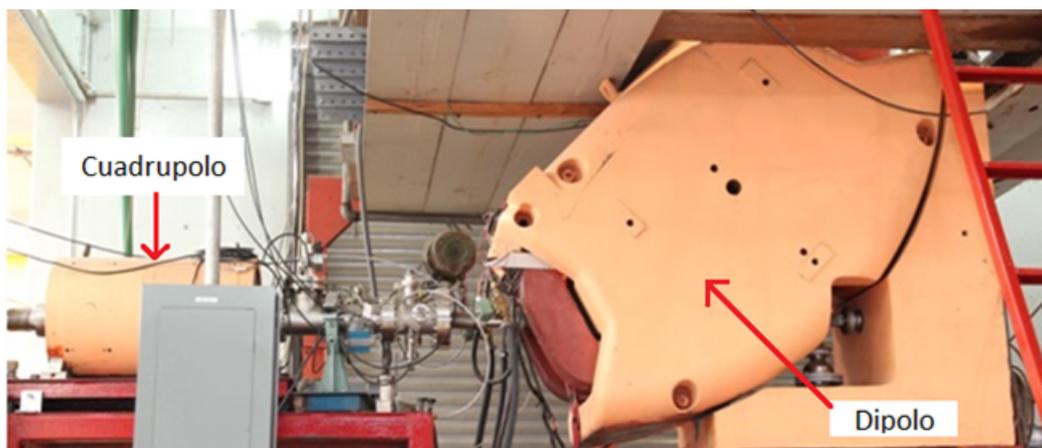


Figura 1.3: Dipolo y duplete de cuadrupolos del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM [6].

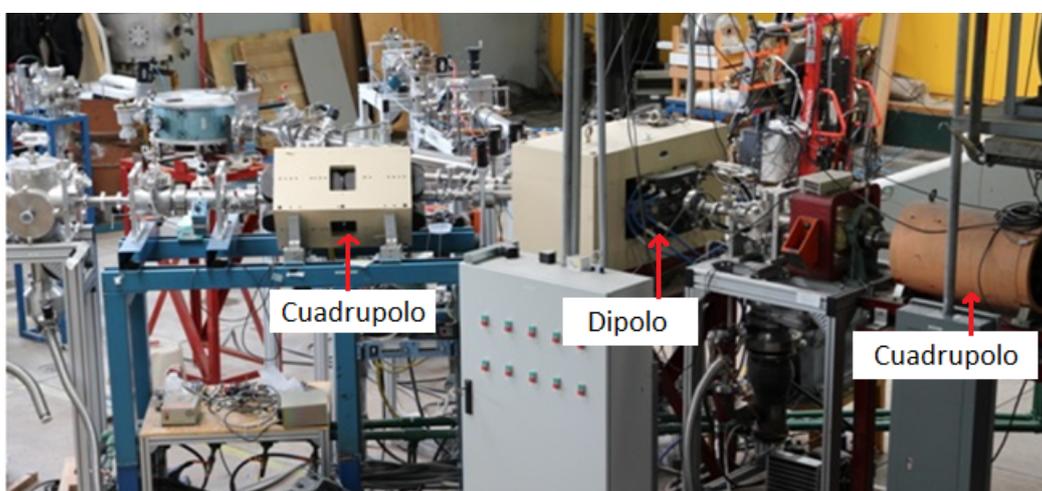


Figura 1.4: Seleccionador y separación de las líneas del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM [6].

1.4. Software de simulación de transporte de haz en aceleradores

A continuación se realiza una breve descripción de los dos softwares del Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), usados para simular el transporte de un haz de protones en el acelerador del Instituto de Física de la UNAM y proponer un cambio en el arreglo de los imanes, para así minimizar la pérdida de haz en los experimentos que se realicen en éste. [22]

1.4.1. MAD-X

MAD-X es un software de uso libre creado en el CERN. Este nos permite simular la trayectoria del haz usando matrices y es particularmente sencillo, ya que no requiere conocer todas las variables de cada componente, solo necesitamos conocer la distancia que recorrerán las partículas en cada uno de éstos y las condiciones iniciales como la emitancia, el largo de los radios x e y del haz en el momento en el que

éste sale de la fuente, la posición de cada componente óptico en la línea experimental, ya sean dipolos, cuadrupolos o multipolos y el grosor de cada imán [4].

1.4.2. TRAVEL

TRAVEL, a diferencia de MAD-X, es un simulador mucho más complejo que usa matrices y mapas de campos magnéticos, que requiere conocer todas las dimensiones y parámetros de cada componente para poder dar un resultado. Este software no es libre y no está a la venta, se requiere estar asociado al CERN para poder usarlo [5], en este trabajo se tuvo acceso a la utilización del programa, dado el apoyo de investigadores de la Universidad de Sinaloa, quienes actualmente colaboran en la óptica de haz de diversos componentes de aceleración en el CERN.

1.5. Sistemas de detección de partículas cargadas

1.5.1. Semiconductores de Silicio

Un sólido cristalino es una estructura de átomos que se repite con un orden periódico y una celda primitiva, es el conjunto mínimo de átomos de un cristal en el que se puede apreciar el periodo característico del cristal. El silicio es entonces un cristal, pues el arreglo de sus átomos es periódico y ordenado. Cada átomo de silicio tiene cuatro electrones en su última capa y cuatro vecinos idénticos a los que está conectado uno a uno con un electrón formando un enlace covalente [24]. La Fig. 1.5 muestra un esquema donde puede apreciarse como distintos átomos de silicio comparten electrones para completar su capa de valencia.

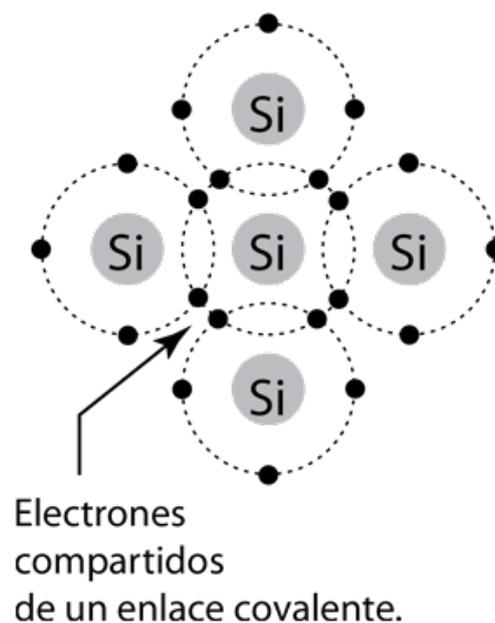


Figura 1.5: Electrones compartidos en un enlace covalente en un arreglo de átomos de Silicio [16].

A una temperatura de cero absoluto no habría electrones libres que puedan conducir corriente, pero al subir tan sólo un poco la temperatura, una fracción de los electrones covalentes se liberan del enlace y se convierten en electrones de conducción, además al liberarse se deja un hueco, hace falta un electrón para completar la última capa de dos átomos y éste hueco atrae a otros electrones en el cristal, de manera que otro electrón lo llenará y en el lugar en donde estaba dejará otro hueco, podemos entonces considerar al hueco como una partícula de carga positiva que se mueve a través del material cómo lo hace el electrón, se le ve entonces como un hueco de conducción y en los semiconductores éstos son tan importantes como los electrones de conducción en el Si. La energía necesaria para poder liberar un electrón a partir del estado inicial es de 1.1 eV por lo que al iluminar el silicio se incrementa su conductividad. A esta energía necesaria se le llama brecha de energía, que es la separación entre la parte más alta de la banda de valencia y la parte baja de la banda de conducción. En promedio la energía necesaria para producir un par electrón-agujero en el Si es de unos 3.6 eV. A temperatura ambiente por ejemplo, se estima que la energía que se imprime al material es de 26 meV, por lo que a esta temperatura, no destaca del todo el silicio como semiconductor, pero al cambiar unos cuantos átomos por los de otro material, podemos mejorar la conducción, a éste proceso se le conoce como dopaje [24].

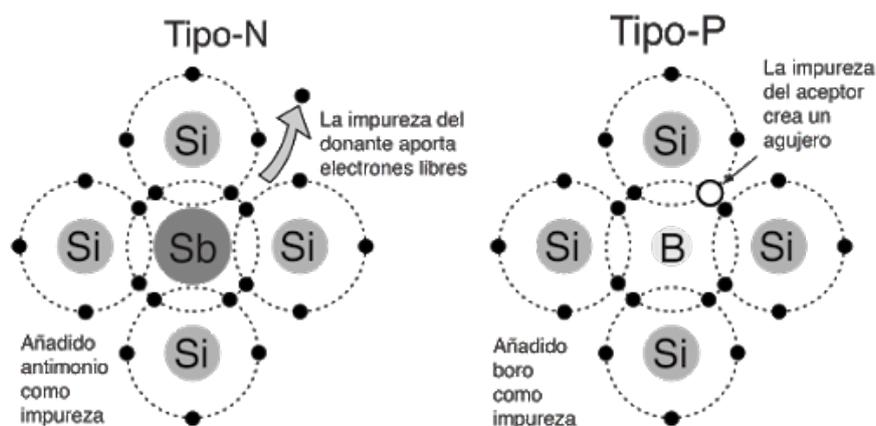


Figura 1.6: Electrones en un arreglo de átomos de Silicio dopados con un átomo de antimonio y uno de boro [16].

Existen dos maneras de dopar al material semiconductor: La primera, es cambiar el átomo por uno que tenga un electrón más que el anterior, por ejemplo, en el caso del silicio se puede cambiar uno de sus átomos por otro de Arsénico, que tiene 5 electrones en su última capa, uno más que el silicio en comparación. Esto hace que quede un electrón libre pues sólo se necesitaban 4 electrones en la última capa para llenar la del átomo y sus vecinos con enlaces covalentes, así, ese electrón es de conducción y se mueve por todo el material. A éste material dopante se le denomina donador y al material, semiconductor tipo N, pues tiene más cargas negativas que huecos. De manera análoga, el segundo método de dopaje cambia un átomo del material original por uno distinto pero con un electrón menos, dejando así un hueco de conducción. A éste tipo de dopante se le da el nombre de aceptor y al material, semiconductor tipo

P, pues tiene más huecos con cargas positivas que electrones libres [24].

Una unión P-N es la frontera entre dos materiales semiconductores, uno de tipo P y el otro de tipo N. El lado P de la unión tiene los huecos que anteriormente describimos y el lado N un exceso de electrones, esto hace que la corriente eléctrica fluya en una sola dirección. Cuando un hueco en el lado P se llena con una carga eléctrica del lado N se deja un ion positivo en el lado N, así se crea una barrera de agotamiento en el que no ocurren más transferencias de electrones, por lo que es necesario suministrar una diferencia de potencial para continuar la transferencia de electrones, a esto que se le conoce como voltaje de BIAS. Si el polo positivo de una batería se conecta al lado P de la unión y el negativo al lado N se trata de un voltaje de polarización directa y en caso de conectar el lado positivo de la batería al lado N y el negativo al lado P se trata de una polarización inversa. En el caso de los detectores que usan semiconductores como en el caso de este trabajo se usa una polarización inversa.

1.5.2. Propiedades

Banda de Energía

Los electrones ocupan niveles de energía discretos y siempre distintos por el principio de exclusión de Pauli que establece que dos electrones en un átomo no pueden tener idénticos número cuántico. Teniendo en cuenta que al tener los electrones muy cerca, en lugar de verlos como niveles discretos, éstos se reemplazan por “bandas” de energía, lo que puede verse cómo muchos estados juntos que simulan ser continuos. Así los electrones naturalmente van llenando las bandas de baja energía primero y mientras más bajas energías tenga una banda más fácil será llenarla. En los semiconductores las bandas con energías bajas están básicamente llenas, mientras que las de energía alta se encuentran vacías y se marca una diferencia entre las bandas de alta y baja energía, hay un espacio en medio con dos bandas a las que llamamos banda de valencia que a temperatura $T = 0^{\circ}\text{K}$ todavía tiene electrones y la banda de conducción que se puebla cuando la temperatura es distinta de cero. Ahora, en los semiconductores se tiene el concepto de que los portadores de carga pueden ser los electrones o los huecos. Los portadores de carga dominantes son los que determinan la conducción, así, no solo los electrones son los que realizan la conducción, sino los portadores de carga dominantes. Para que los electrones puedan conducir en los semiconductores se debe tomar en cuenta que no pueden conducir aquellos que estén aglomerados en una sola banda, sólo los electrones que se encuentren en la banda de valencia y conducción pueden conducir. Cuando un electrón recibe un fotón, éste lo absorbe y si la energía que le transfiere no es suficiente para elevarlo de la banda de valencia a la de conducción, entonces lo vuelve a emitir y se queda con la energía que tenía. De manera similar al dopar un material con átomos ajenos, la presencia de estos dopantes afectarán las propiedades del material respecto a la conducción de electricidad pues estos tienen otros niveles de energías, por lo que al tratarse de semiconductores, también veremos niveles de energía para un donador o aceptador cerca de las bandas de valencia y conducción [25, 36].

1.5.3. Producción de partículas Alfa

En la historia de la humanidad, el hombre ha buscado entender su entorno y desde Demócrito, ya se hablaba del átomo como la parte fundamental de la materia que es indivisible, ahora con el avance de la tecnología y con el trabajo de muchísimos científicos entendemos mejor cómo está compuesta la materia y cómo interacciona a nivel subatómico [23].

Entre estas interacciones logramos entender la descomposición de la materia, cómo es que los átomos se vuelven inestables y se separan en fragmentos grandes o pequeños. Así se ha intentado clasificar esta fragmentación y se le ha dado el nombre de radiación.

Esta radiación puede ser de varios tipos según la partícula que se emita del átomo y también se puede diferenciar por la energía con la que se emite. En la Fig. 1.7 se describen las diversas desintegraciones que puede sufrir un núcleo.

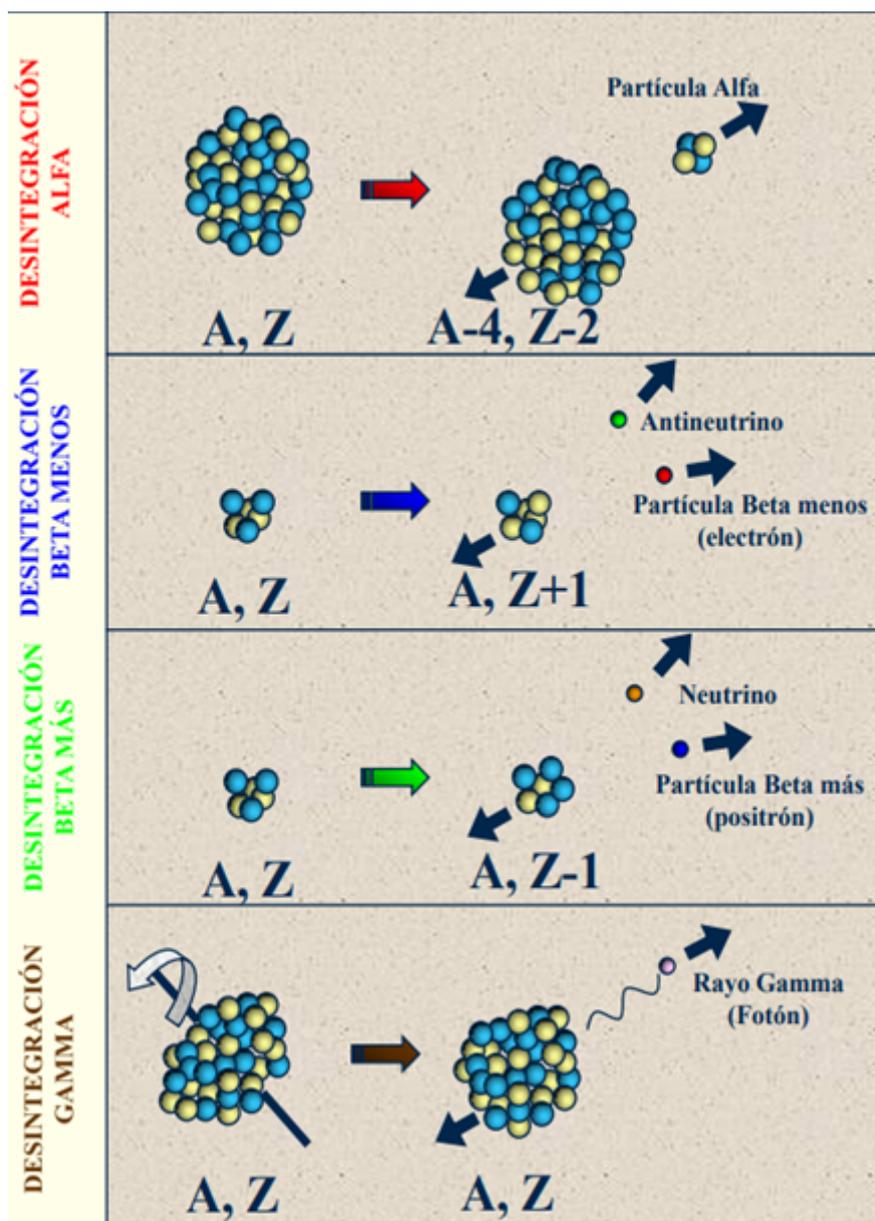


Figura 1.7: Clasificación de desintegración en un átomo [23].

Este trabajo se enfoca en la detección de partículas alfa por lo que se describirá con mayor detalle este tipo de radiación.

Desintegración Alfa

Un átomo está constituido por electrones, protones y neutrones con carga negativa, positiva y neutra, respectivamente. Estas partículas conviven en armonía de manera poco intuitiva: los protones y neutrones se encuentran en el núcleo del átomo juntos, unidos por la fuerza nuclear fuerte que contrarresta la repulsión coulombiana que hay entre los protones, mientras que los electrones se mueven entre estados u órbitas alrededor del núcleo. Cada elemento de la tabla periódica está caracterizado por el número de

protones en su núcleo y al variar la cantidad de neutrones obtenemos los isótopos de esos elementos, sin embargo no se puede variar tanto la cantidad de éstas partículas ya que la estabilidad del átomo depende de que la fuerza nuclear fuerte sea siempre mayor a la repulsión coulombiana, si éste equilibrio se pierde se emiten partículas del núcleo hasta que se estabiliza de nuevo. En particular, cuando se emiten dos protones unidos con dos neutrones (núcleos de helio doblemente ionizados) llamamos a ésta radiación alfa (también descrita por la letra griega α). Dada su alta energía de entre 2 MeV y 9 MeV y peso considerable de 4 uma, interactúan y ionizan fácilmente las partículas que hay en su camino, por lo mismo su poder de penetración en materiales es corto ya que pierden su energía prontamente dadas éstas interacciones y facilitando también su detección [7].

Con el descubrimiento de la radioactividad se buscó medirla y se empezó notando el cambio en la tasa de desintegraciones con el tiempo, de dónde se derivó la siguiente ecuación:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Definimos la actividad de una muestra A, como el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo t. Dónde λ (constante de desintegración), se define como la probabilidad de desintegración de un núcleo por unidad de tiempo. Considerando N el número de átomos de un radionucleido en el instante t, siendo N_0 el número en tiempo cero. Se usan unidades de Becquerel o Becquerelio ($Bq=1/s$) en el Sistema Internacional y Curie o Curio ($Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$) de manera tradicional [30].

Se define además la semi-vida como el periodo de tiempo necesario para que decaiga la mitad de la muestra:

$$A(t_{\frac{1}{2}}) = \frac{A_0}{2} \rightarrow \frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda t} \rightarrow t_{\frac{1}{2}} = \frac{\text{Ln}2}{\lambda} \quad (4)$$

Y a partir de ésta definición decimos que la vida media es el tiempo promedio que tarda un núcleo sólo en decaer o desintegrarse:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t | \frac{dN}{dt} | dt}{\int_0^{\infty} | \frac{dN}{dt} | dt} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{\frac{1}{2}}}{\text{Ln}2} \quad (5)$$

Propiedades generales

En general el decaimiento alfa se puede describir con la siguiente ecuación:



Dónde A es la masa atómica, Z es el número atómico, N el número de neutrones en el átomo, X el átomo que decae y finalmente Y y α el producto del decaimiento, un átomo Y de menor masa y la radiación α antes descrita [30].

Las partículas alfa poseen ciertas características relevantes. La emisión alfa es un efecto debido a la repulsión Coulombiana y tiene dos importantes restricciones:

1. Se limita principalmente a átomos con número másico mayor a 190 .
2. Sólo poblará estados bajos del núcleo hijo pues la probabilidad de transición tiene una dependencia exponencial muy sensible a la energía.

Surge también la pregunta ¿Por qué emiten sólo átomos de helio? Para entender esto es necesario comprender que de todas las posibilidades que pudiéramos pensar, i.e. variar los protones y neutrones, se necesitaría más energía para mantener cada átomo por separado en los otros casos [7].

En la Tabla 1.1 se muestran las energías de liberación para varios casos en torno al ${}^4\text{He}$.

Tabla 1.1: Energía liberada según el tipo de partícula emitida por un átomo [7].

Partícula	n	${}^1\text{H}$	${}^2\text{H}$	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$	${}^5\text{He}$	${}^6\text{He}$	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Be}$	${}^{12}\text{C}$
Energía Liberada (MeV)	-7.26	-6.12	-10.7	-9.92	5.41	-2.59	-6.19	-3.79	-1.94	10.8	24

Producción de partículas alfa por fuentes radioactivas.

Como hemos explicado, los elementos más pesados se desintegran en otros más ligeros a través de la desintegración alfa. En particular nos interesa estudiar el Curio, Plutonio y Americio, pues la fuente usada para la caracterización en este trabajo se compone de estos tres elementos [7].

El Plutonio tiene cinco isótopos, entre ellos está el ${}^{239}\text{Pu}$ con una semi-vida de 24,000 años, con una actividad específica de 0.063 Ci/g que puede decaer emitiendo partículas alfa y puede emitirlos con tres energías diferentes. Para cada energía existe una probabilidad de que decaiga con esa energía, para el caso de éste isótopo los casos se muestran en la Tabla 1.2 [8].

Tabla 1.2: Distintas energías con las que se emiten las partículas alfa en la desintegración del ${}^{239}\text{Pu}$ y su probabilidad de ser emitida con dicha energía. [8]

Radionucleido	Energía de Partícula Alfa [MeV]	Intensidad[%]
Pu-239	5.105	11.5
	5.143	15.1
	5.155	73.4

La actividad específica se define como la radiactividad por unidad de masa o de cantidad de materia

e indica la abundancia de un isótopo con respecto al total de átomos de ese elemento. El Curio tiene ocho isótopos, entre éstos el ^{244}Cm con una semi-vida de 18 años, con una actividad específica de 82 Ci/g que puede decaer emitiendo partículas alfa con dos energías diferentes(ver Tabla 1.3) [9].

Tabla 1.3: Distintas energías con las que se emiten las partículas alfa en la desintegración del $^{244}\text{Curio}$ y su probabilidad de ser emitida con dicha energía [9].

Radionucleido	Energía de Partícula Alfa [MeV]	Intensidad[%]
Cm-244	5.763	23.3
	5.805	76.7

El Americio tiene tres isótopos, entre éstos el ^{241}Am con una semi-vida de 430 años, con una actividad específica de 3.5 Ci/g que puede decaer emitiendo partículas alfa con tres energías diferentes (ver Tabla 1.4) [10].

Tabla 1.4: Distintas energías con las que se emiten las partículas alfa en el decaimiento del $^{241}\text{Americio}$ y su probabilidad de ser emitida con dicha energía [10].

Radionucleido	Energía de Partícula Alfa [MeV]	Intensidad[%]
Am-241	5.388	1.4
	5.443	12.8
	5.486	85.2

1.5.4. Detector DSSSD

El DSSSD por sus siglas en inglés Double-Sided Silicon Strip Detector, es un detector de silicio segmentado en tiras de diferentes tamaños en el que sus dos caras son sensibles a la detección. El detector utilizado en este trabajo tiene 16 tiras verticales en la cara frontal y 16 tiras horizontales en la cara trasera. Tiene $60\mu\text{m}$ de espesor y 3 mm de ancho por tira con $5\times 5\text{cm}^2$ de área activa. A diferencia de un detector de silicio convencional, el DSSSD tiene la capacidad de discriminar la dispersión de partículas de acuerdo a la tira que detecte un evento. Más aún, la información en las tiras horizontales y verticales puede correlacionarse generando información en un plano coordenado, en el que cada cuadrado o pixel formado por una tira vertical y una horizontal, conforma un punto en el espacio de la reacción, con lo que se puede generar un mapeo de la reacción de acuerdo con la información hallada en cada pixel [12, 13].

Para que el detector se optimice se suministra una diferencia de potencial, que en este caso es de -25V, que genera un campo eléctrico homogéneo entre las dos caras de detección. A esta acción se le conoce como “polarización del detector”, y a la tensión suministrada se le conoce como tensión de BIAS (o BIAS voltage, en el idioma inglés). Se define entonces al grupo de tiras dopadas con carga positiva

como la cara P o frontal y a las tiras dopadas con carga negativa como cara N o trasera, así la carga inducida por una partícula genera una señal positiva de un lado y otra equivalente negativa del otro (la polaridad de la señal no necesariamente se observa en acuerdo con la definición de las caras, ya que ésta depende de la dirección de polarización de la corriente en el detector). Un evento físico sólo se registra si una carga es detectada en ambos lados del detector en un tiempo del orden de nanosegundos, si esto no ocurre o si se detecta más de una coincidencia entonces se clasifica el evento como ruido electrónico.

En la imagen de la Fig. 1.8, se puede apreciar el detector utilizado para los estudios realizados en el presente trabajo y en la Fig.1.9 la estructura de las tiras en la superficie del material.

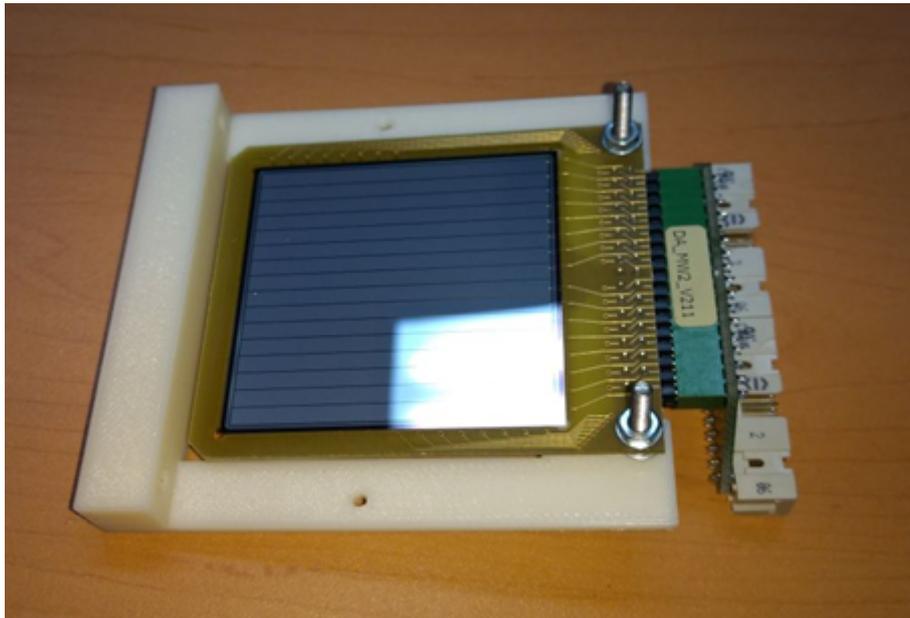


Figura 1.8: Fotografía del detector de silicio DSSSD.

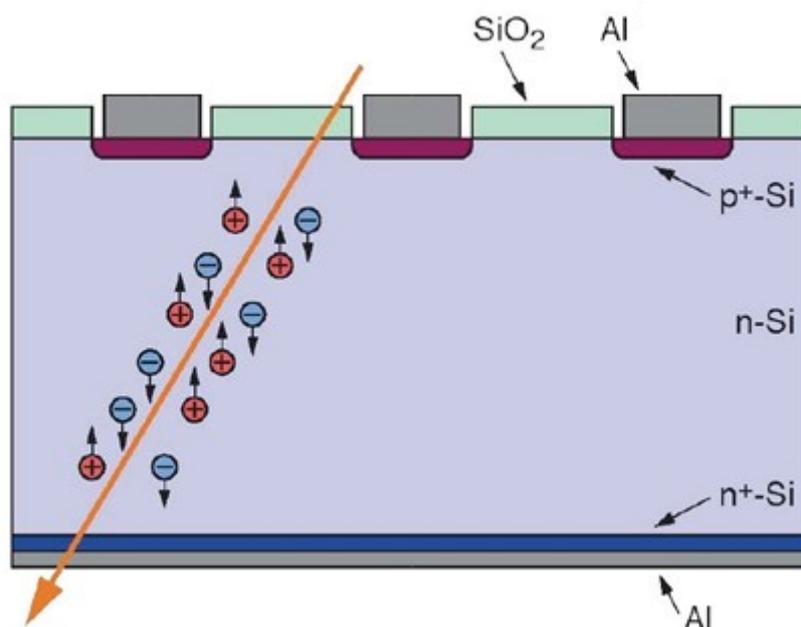


Figura 1.9: Estructura de las tiras del detector DSSSD en la superficie [46].

Una vez diferenciado el ruido de los eventos que son de interés, las señales generadas por la interacción entre las partículas y el detector son registradas por un sistema de preamplificación (de carga, en este caso), cuyo propósito es el de extraer la señal del detector sin degradar de manera significativa la razón entre la señal y ruido, razón por la que el preamplificador siempre debe tener el contacto más directo posible con el detector. La señal analógica y diferencial es enviada mediante cables de varios hilos a la tarjeta de digitalización del Sistema de adquisición de datos. De acuerdo a las especificaciones de las tarjetas que componen FEBEX, la señal debe tener una amplitud entre -1V y 1V [37].

1.6. Sistema de adquisición de datos

A continuación, se explica el funcionamiento de un sistema de adquisición de datos de manera introductoria y se muestra entonces las características del sistema FEBEX3 [26].

1.6.1. Introducción

La adquisición de datos es la parte de un sistema de detección que se encarga de registrar la información recabada por el detector. Un fenómeno físico en el detector se convierte entonces en algún tipo de variable que puede ser observada y registrada en un sistema de cómputo a través de la conversión de información analógica verdadera en información digital, utilizando para ello una serie de dispositivos como tarjetas de conversión de señales analógico/digital, tarjetas de procesamiento de datos, gestores de señal de disparo, etc. El conjunto de dispositivos compone el sistema de adquisición de datos (conocido en la jerga experimental como DAQ, siglas en inglés de Data AcQuisition). En nuestro caso particular, la

carga en un canal o tira del detector, genera una señal de cierta amplitud y longitud temporal (variables que describen el tipo de partícula y su energía); la señal es leída entonces por el DAQ y procesada para ser convertida en una señal digital y poder ser observada en la pantalla de una computadora a través de un software específico. La amplitud en tensión de la señal, es proporcional a la energía de la partícula, el tiempo de subida y de caída de la señal se relaciona con el tipo de evento (partícula o fotón) [14, 30, 37, 38].

El proceso de acondicionamiento de una señal sigue un camino particular: Las tarjetas de adquisición de datos funcionan con ciertas diferencias de potencial, por lo que si el emisor (preamplificador) genera una variación de intensidad entonces se le debe convertir en una diferencia de potencial proporcional a la que acepta la tarjeta, por otra parte las señales de un detector suelen ser de un cierto tamaño, así que se le amplifica para que pueda ser detectada por la tarjeta y pueda recorrer todo su margen y además no se confundan con ruido, que puede filtrarse en el mismo camino. Viene entonces el sistema de filtrado que elimina ruidos de alta frecuencia y puede tratar la señal del detector a un cierto límite de limpieza [14, 30, 37, 38].

Tarjetas de adquisición de datos.

Las tarjetas de lectura o ADC (analogic/digital converter) cuentan con una serie de características que determinarán su calidad, éstas son:

Número de canales de conversión: Una tarjeta puede adquirir una cantidad de señales distintas, que se enumeran en canales de adquisición.

Velocidad de muestreo: Indica qué tan bien se representa una señal analógica y aquí entra primero el Teorema de Muestreo de Nyquist-Shannon, fundamental en la teoría de la información, éste dice “La frecuencia de muestreo mínima requerida para realizar una grabación digital de calidad, debe ser igual al doble de la frecuencia de audio de la señal analógica que se pretenda digitalizar y grabar”. Además, ésta característica tiene que ver con la anterior, pues la velocidad sigue la siguiente ecuación[14]:

$$V_{\text{muestreo por canal}} = \frac{V_{\text{muestreo ADC}}}{n^{\circ} \text{canales}} \quad (7)$$

Resolución: Ésta depende del número de bits que tenga un ADC a cargo de representar una muestra, es decir, a más bits una mejor capacidad de detectar variaciones más pequeñas en la señal.

Rango de entrada: Define los límites en los que la señal que entra debe estar para que se le pueda convertir. Si se tiene un mayor rango entonces hay mejor precisión pues con los mismos bits de resolución se deben representar con un rango menor.

Capacidad de temporización: Es la capacidad de manejar las funciones y el tiempo en el que se realizan dentro de la computadora, es decir, se pueden controlar los momentos en los que se debe leer una señal por dar un ejemplo.

Comunicación con la computadora: La tarjeta se puede comunicar con la computadora por interrupción con la entrada y salida o con un acceso directo a la memoria, que en el segundo caso permite manejar muchos más datos.

Además, está el tiempo de conversión de un sistema, que es realmente relevante pues en la práctica un sistema que digitalice con precisión, pero que tome tiempos muy grandes no es práctico, sin embargo esto dependerá de cada experimento, tomando en cuenta la cantidad de eventos que se deben digitalizar y la capacidad de diferenciar varios eventos que ocurran en un periodo corto de tiempo [14].

1.6.2. Sistema FEBEX3

Febex es un sistema de digitalización de datos desarrollado en el GSI (Centro de Investigación de Iones Pesados) en Darmstadt-Alemania que nos permite digitalizar un pulso sin necesidad de un amplificador y por su manera de filtrar la información permite trabajar en un ambiente muy “ruidoso” y detectar y medir pulsos de muy baja amplitud. Se puede programar para trabajar con señales positivas o negativas y su interfaz está diseñada para funcionar con el sistema de adquisición de datos MBS (Multi Branch System) que puede instalarse en los sistemas operativos Linux y LynxOS. Mediante MBS se pueden controlar todas las variables medibles por FEBEX: La configuración, pruebas de arranque, iniciar o detener una toma de datos, lectura de datos y salvar estos mismos [26]. En las siguientes subsecciones se describen las diferentes tarjetas componentes del sistema FEBEX.

1.6.2.1. Módulo FEBEX3

Las tarjetas cuentan con 16 entradas análogas, 16 LVDS I/Os diferenciales y cuatro conexiones multi-gigabit seriales para el backplane o placa que conecta varios conectores en paralelo para transferir los datos entre los componentes y cuentan con una fuente de alimentación programable de CD, diseño 1U con las siguientes especificaciones: [26]

Potencia: 1500 W.

Tensión: 0-600 VCD (depende del modelo).

Corriente: 0-300 ACD (depende del modelo).

Entrada monofásica.

En la imagen de la Fig. 1.10, se muestran 4 tarjetas FEBEX-3, dos de ellas tienen conectado un cable plano de 16 señales, mientras que la tercera tarjeta tiene conectado un solo canal de señal analógica.

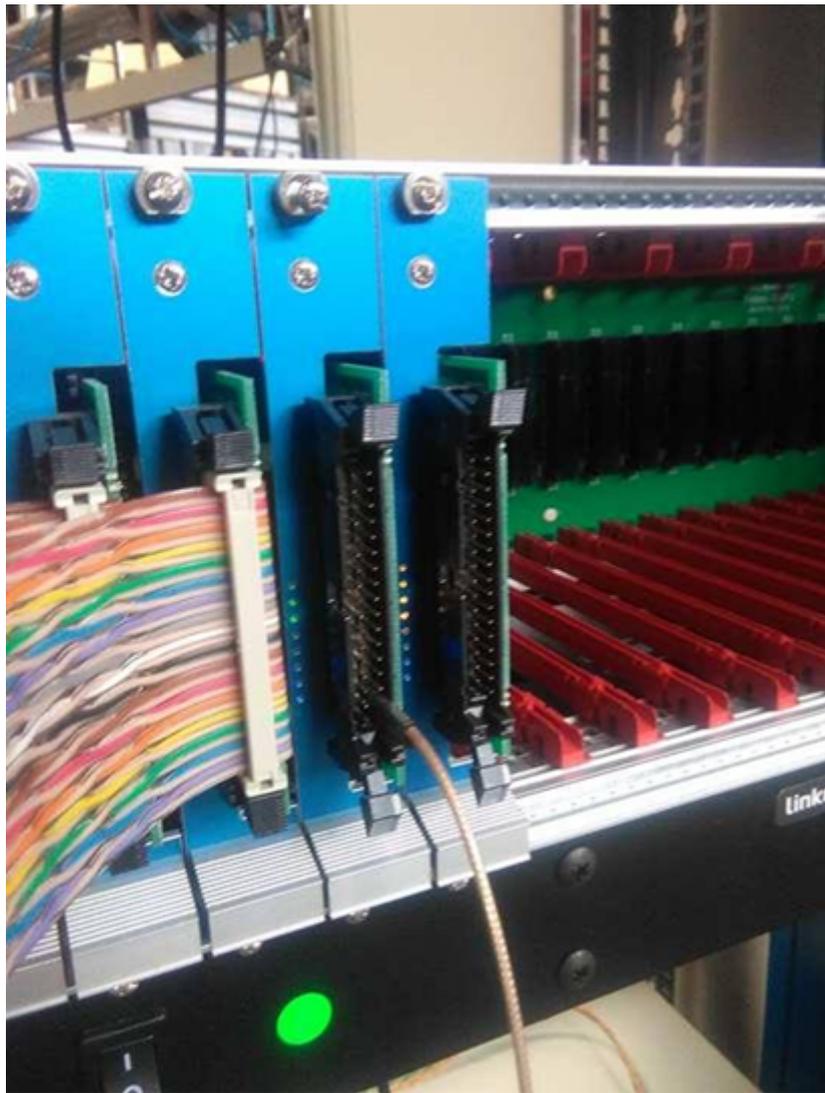


Figura 1.10: Fotografía de las tarjetas: Modulo FEBEX3 que se encuentra en el Laboratorio LEMA del Instituto de Física, UNAM.

1.6.2.2. Módulo Exploder

EXPLODER es una versión de una interface entre diferentes combinaciones de I/O (en tarjetas hijas) y un enlace de fibra óptica de múltiples gigabits. El tamaño de la tarjeta principal e hija es de 100 mm x 124 mm y el tamaño de la caja es de 120 x 140 x 32 mm. Ambas tarjetas están conectadas a través de dos conectores de alta velocidad y densidad, con 104 pines cada una. Este módulo se conecta a una red Ethernet totalmente determinista para la transferencia y sincronización de datos de uso general y puede sincronizar más de 1000 nodos con precisión sub-ns sobre longitudes de fibra de hasta 10 km [26, 39].

Una fotografía con un diagrama esquemático del módulo EXPLODER se muestra en la Figura 1.11.

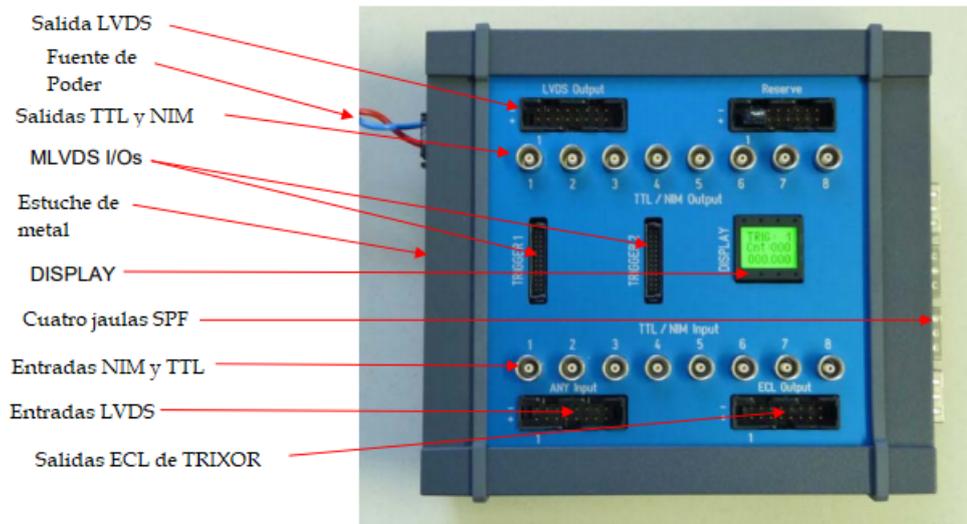


Figura 1.11: Vista superior del módulo EXPLODER que se encuentra en el Laboratorio LEMA del Instituto de Física, UNAM.

1.6.2.3. PEXOR3

PEXOR3 o Pci-EXpress Optical Receiver fue desarrollado para conectar el módulo EXPLODER y FEBEX a computadoras estándar. El centro de PEXOR es un FPGA o matriz de puertas programables que cuenta con 4 puertos para fibra óptica de 2 Gbit/s [26, 40].

La Fig. 1.10 muestra una fotografía de la tarjeta PEXOR.

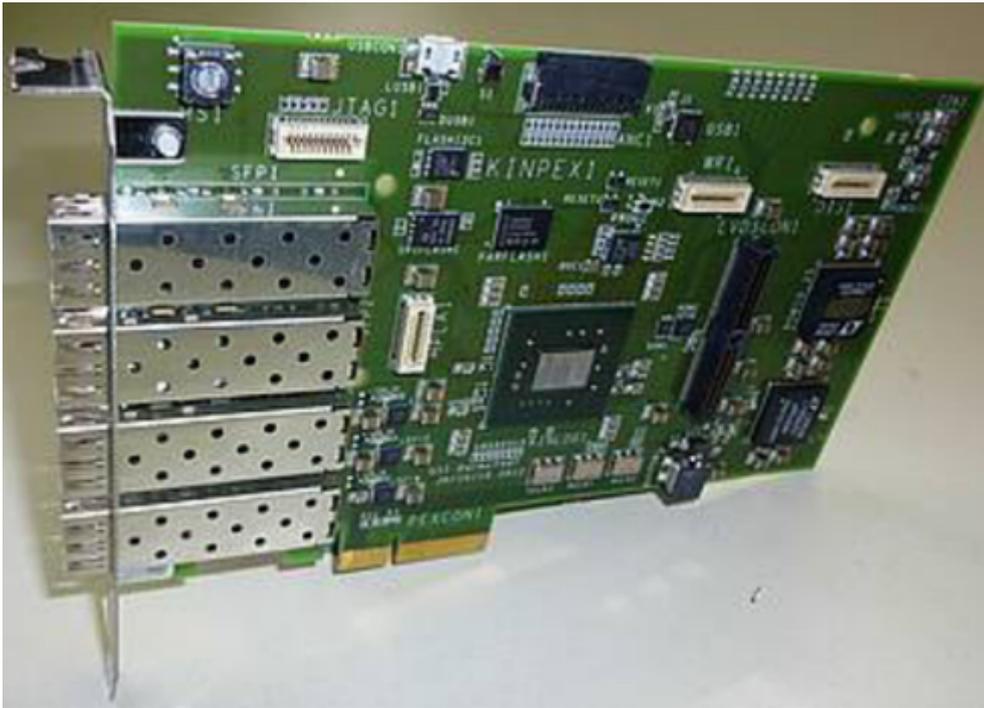


Figura 1.12: Módulo de la Computadora Principal PEXOR3 [26].

1.6.2.4. TRIXOR

TRIXOR es un módulo de triggers que funciona como maestro (disparador de entrada) y esclavo (disparador desde el bus de disparo). Ignora entradas de trigger si la señal de salida de tiempo muerto ocupada se retrasa 100 ns después del final de la señal de entrada del disparador. El trigger aceptado es enviado a través del conector de trigger I/O al PEXOR, que luego se transforma en un interruptor PCI Express para notificar a la computadora del procesador de una lectura [26, 41].

Un módulo TRIXOR se muestra en la imagen de la Fig. 1.13.



Figura 1.13: Módulo de la Computadora Principal PEXOR3 [26].

1.6.3. Software de monitorización de datos Go4

El Marco de Análisis Go4 (GSI Object Oriented On-line-Offline) desarrollado en el GSI (Centro de Investigación de Iones Pesados) en Darmstadt-Alemania es el software de monitorización de los datos generados por FEBEX a través de MBS y funciona basado en ROOT por lo que cualquier comando de éste funciona de la misma manera. Con Go4 podemos leer los datos adquiridos y guardarlos con diferentes extensiones (root, jpeg, pdf, etc). Las corridas de datos pueden guardarse desde MBS con extensión lmd (list mode data) [27].

Go4 tiene dos partes: el marco de análisis por sí mismo y una interfaz gráfica del usuario (GUI) basado en Qt, un marco multiplataforma orientado a objetos. Esta separación es especialmente útil para el monitoreo online. El análisis se corre desincronizado de la interfaz y puede correrse en un modo interactivo o remoto controlado por la interfaz. De esta manera la interfaz puede usarse como navegador para archivos ROOT y como un visualizador de histogramas. Además el análisis se puede correr como un cliente asociado a una interfaz o puede ser iniciado como un servidor de análisis con la posibilidad de conectarlo a varias interfaces con un controlador y un número arbitrario de observadores con comandos restringidos [27]. El diagrama de la estructura de Go4 puede consultarse en la Fig. 1.14.

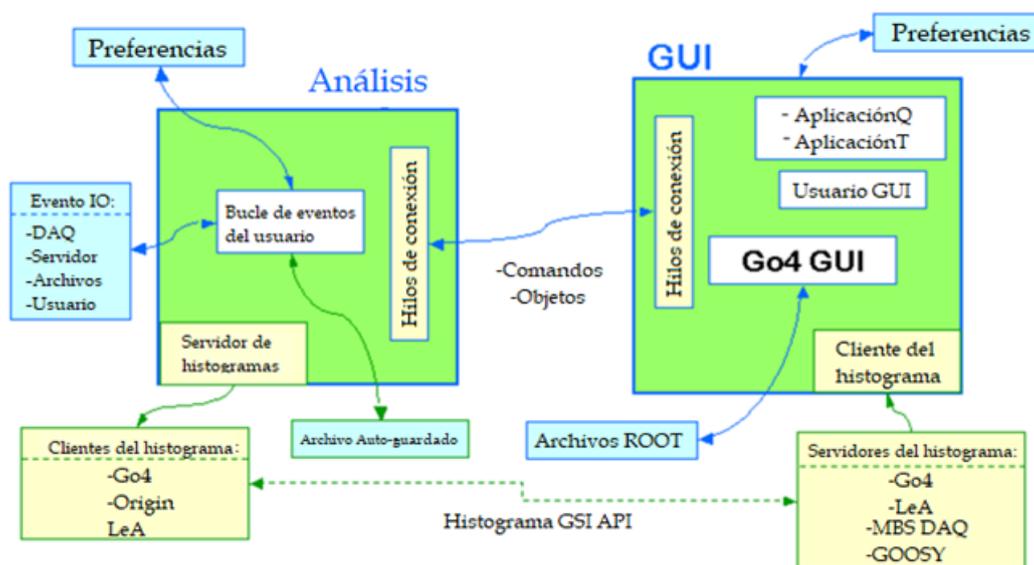


Figura 1.14: Diagrama de la estructura de Go4, con el Análisis e Interfaz Gráfica del Usuario [27].

El marco de trabajo (Framework) de Go4 maneja estructuras de eventos, procesamiento de eventos y eventos de Input/Output. La recursión del evento de análisis está organizado por pasos, cada uno con un evento de entrada, uno de salida y un evento procesador, el cual también tiene acceso al evento de entrada. En la figura 1.15 se puede observar un diagrama de los pasos para el análisis. En el primer paso un evento objeto (input 1) se llena con un evento de entrada (input), luego un evento de salida (output 1) se llena por un objeto procesador de eventos (process 1) que tiene acceso al input 1 y output 1. Aquí

se puede escribir un archivo como paso opcional (file 1). En el siguiente paso el objeto de evento de entrada (input 2) puede ser tanto el objeto de evento de salida del paso anterior (output 1) como tomar la información del archivo guardado del paso opcional. Después el objeto de evento de salida (output 2) es llenado por el segundo objeto procesador de eventos (process 2) y de nuevo existe la opción de salvarlo como un archivo (file 2) [27].

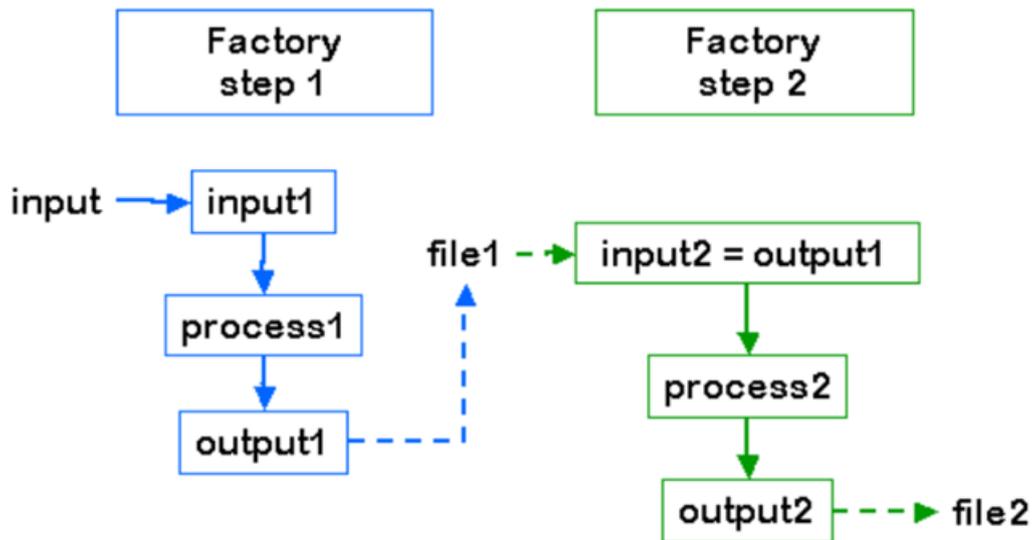


Figura 1.15: Diagrama de los pasos para el análisis en Go4 [27].

La información necesaria para crear los objetos de evento y procesadores (que son borrados cuando termina la recursión) es guardada en fábricas (Factory) que son guardadas en el análisis [27].

Las clases de eventos, de procesador y salida deben ser proporcionadas por el usuario, mientras que las clases de entrada para fuentes de un evento GSI estándar son proporcionadas por Go4. El análisis y los pasos de clases de fábricas son proporcionados por Go4 o pueden ser implementados por el usuario como subclases [27].

Capítulo 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la caracterización de los canales se realizan cinco tomas de datos, dos para una fuente triple alfa (^{239}Pu - ^{244}Cm - ^{241}Am), una para una fuente gamma de ^{137}Cs , una para una fuente gamma de ^{60}Co y una para un haz de protones con 2 MeV de energía, que fueron dispersados por una placa de oro. En el caso de la fuente triple alfa se colocó el detector DSSSD frente a la fuente en un sistema al vacío, para las fuentes de Cesio y Cobalto se colocó un detector de Germanio ORTEC con un sistema de enfriado con nitrógeno líquido frente a las fuentes al aire libre y finalmente para el haz de protones se colocó una fuente de protones frente a la lámina de oro y el DSSSD detrás del blanco de oro a un ángulo desde la vertical del haz de 105° .

Después de la primera toma de datos con la fuente triple alfa la conexión entre la bomba de vacío mecánica que funciona con aceite se rompió mientras ésta estaba en funcionamiento, por lo que el detector DSSSD vio alterada su resolución en energía, debido a la nube de aceite que entró al sistema.

2.1. Procedimiento experimental

A continuación se explica el procedimiento que se siguió para realizar el experimento:

2.1.1. Procedimiento experimental

Optimización de la línea

Con el software MAD-X se realiza la simulación del transporte de un haz de partículas en la línea del acelerador Van de Graaff de 5.5 MeV y se busca minimizar la pérdida del haz. Dentro del transporte la principal limitante es que el haz solo se puede modificar hasta que llega al primer cuadrupolo pues por el tamaño del dipolo y la manera en la que está instalada la línea sólo el primer duplete de cuadrupolos tiene la facilidad de poder moverse. Por otra parte para la caracterización del detector DSSSD no es necesario

optimizar la línea, sin embargo para los experimentos que se realizarán posteriormente en la línea sí, y cómo el propósito de este trabajo es optimizar la línea del acelerador y caracterizar el sistema FEBEX3 se incluye en este apartado el trabajo realizado para la optimización de dicha línea.

En cuanto a los dipolos se contempla el hecho de que el primer dipolo gira el haz en un plano y que el segundo lo gira sobre un plano ortogonal al primero, de manera que el primer dipolo debe afectar solamente una coordenada transversal del haz, mientras que el otro afecta a la otra coordenada.

Para encontrar los casos óptimos de la fuerza de los cuadrupolos, definidos como k_1 , se realiza un estudio con MAD-X, de manera que se encuentra una solución óptima para el tamaño de haz que se desea al final de la línea, de este estudio se desprende que hay muchos valores que pueden tomar los cuadrupolos para enfocar adecuadamente el haz al final de la línea, pero la mayoría deriva en un haz demasiado grande durante el transporte de éste y chocará con las paredes por lo que se perderá gran parte del haz. Ahora se presentan las siguientes figuras de las simulaciones en las que se trazan los parámetros Twiss β_x y β_y que no deben de exceder de 51.2 unidades cada una considerando una emitancia de 5 mm/mrad, si se desea mantener todo el haz dentro de los tubos, también se presenta la dispersión en las gráficas, cómo D_x y D_y :

Casos con el primer cuadrupolo negativo:

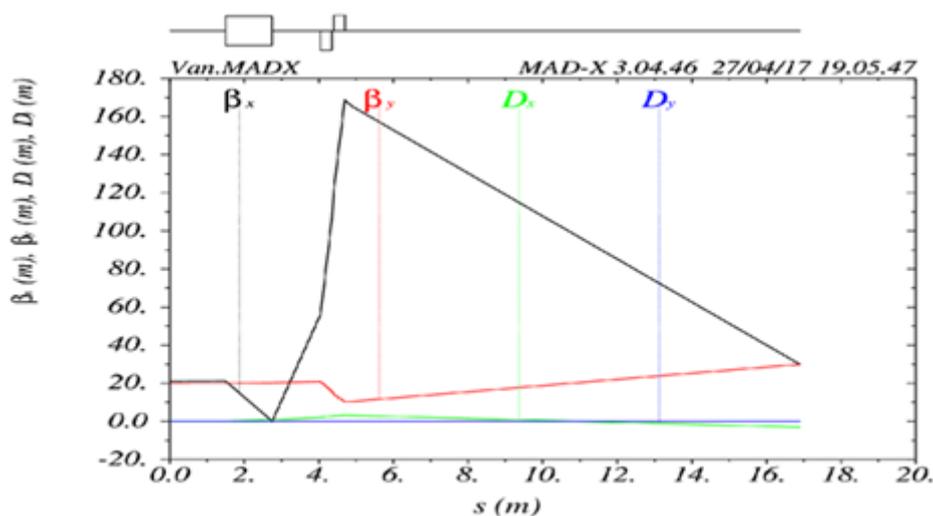


Figura 2.1: Simulación del mejor caso enfocando a un punto sólo con el primer doblete: primer cuadrupolo negativo con valores $k_1 = -3.02285$ y $k_1 = 3.87462$. Enfocando a $30 \beta_x$ y β_y .

En este primer caso (Fig. 2.1) se obtiene un haz enfocado al final de la línea pero excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_y por más de cien unidades.

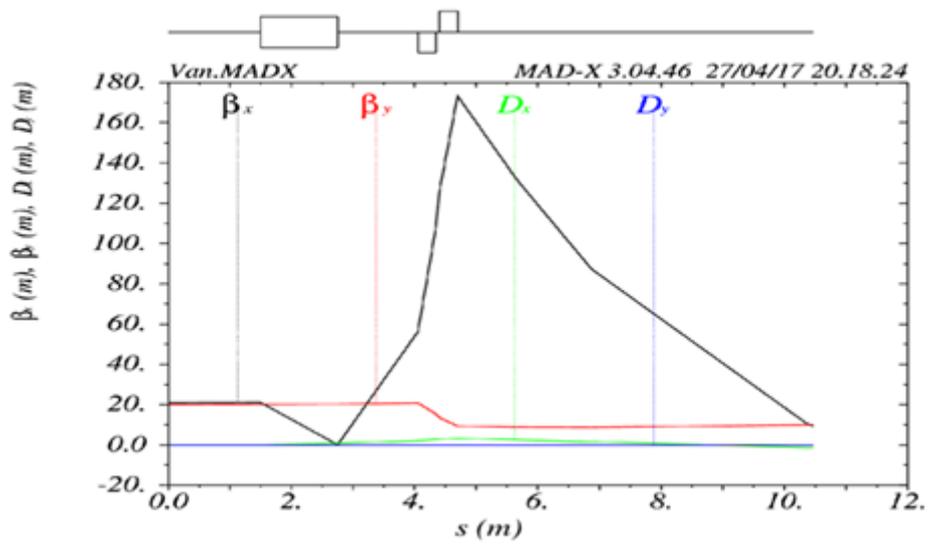


Figura 2.2: Simulación del caso enfocando el haz a un punto pequeño con el primer cuadrupolo negativo con valores $k_1 = -3.40177$ y $k_2 = 4.37682$. Enfocando a $10 \beta_x$ y β_y .

En este caso (Fig. 2.2), se obtiene un haz enfocado al final de la línea pero excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_y , por más de cien unidades.

Casos con el primer cuadrupolo positivo:

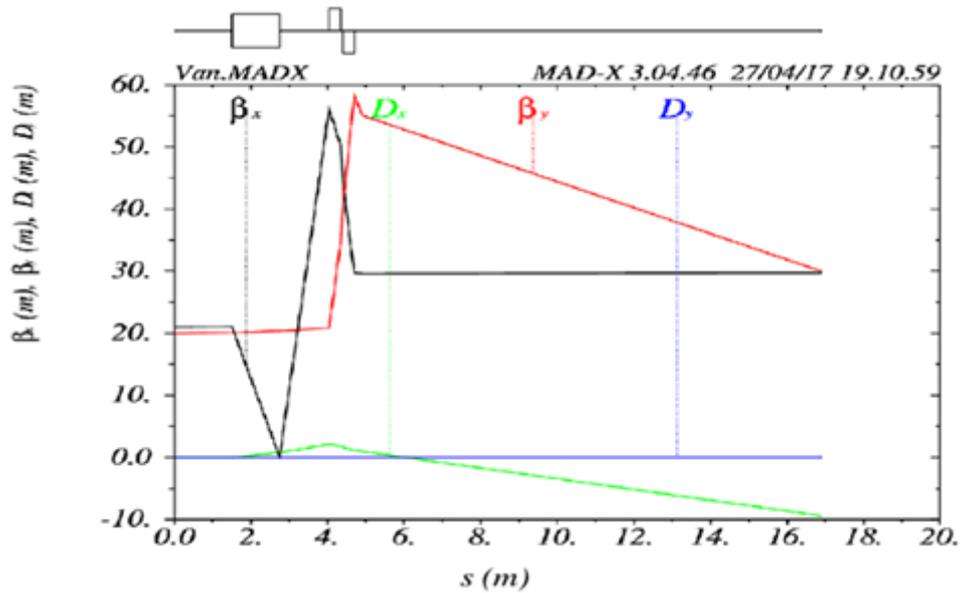


Figura 2.3: Simulación del caso donde se quiere un haz paralelo: primer cuadrupolo positivo. $k_1 = 6.23520$ y $k_2 = -4.80652$. Enfocando a $30 \beta_x$ y β_y .

En este caso (Fig. 2.3) se obtiene un haz enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y por menos de 10 unidades.

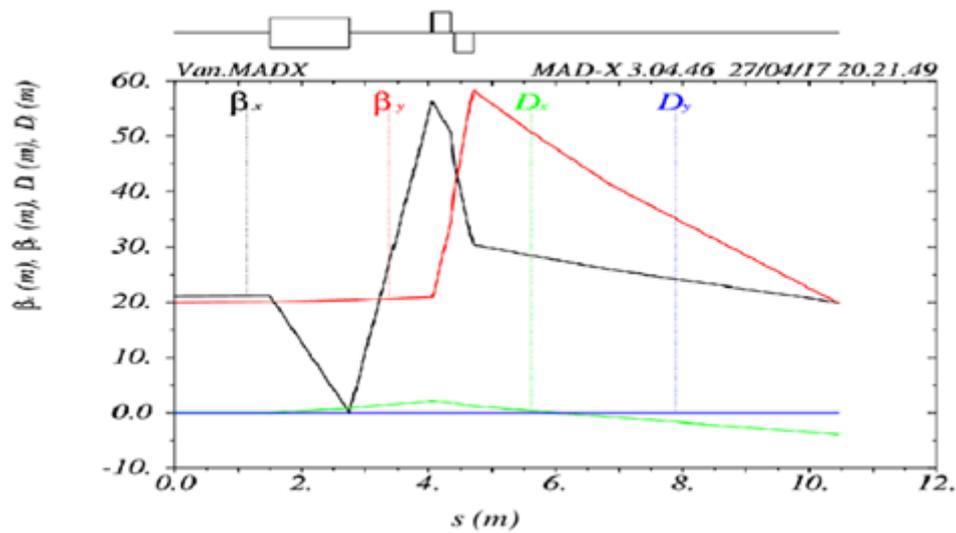


Figura 2.4: Simulación del haz enfocándose a un punto pequeño: primer cuadrupolo positivo. $k_1 = 6.10788$ y $k_1 = -4.50599$. Enfocando a $20 \beta_x$ y β_y .

En este caso (Fig. 2.4), se obtiene un haz enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y por menos de 10 unidades.

Casos con el primer y segundo cuadrupolo de los dobletes positivos:

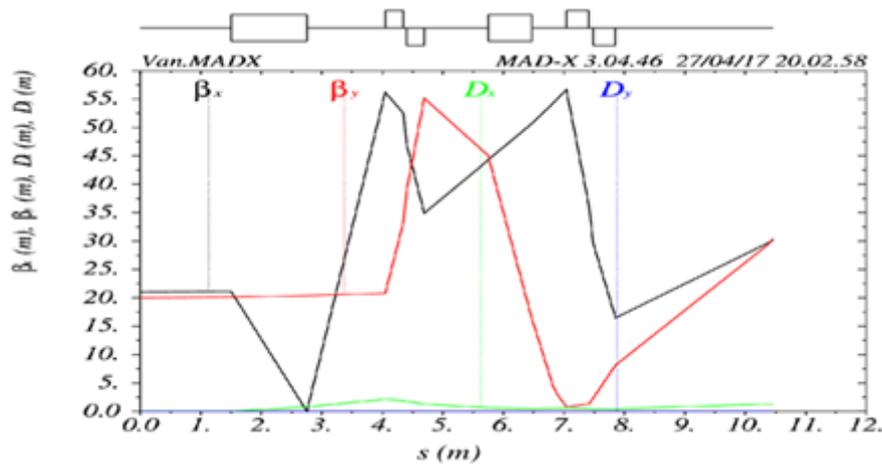


Figura 2.5: Simulación del mejor caso para obtener un haz divergente: primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos. $k_1 = 5.7431$ y $k_1 = -4.39398$ para el primero. $k_1 = 3.45464$ y $k_1 = -5.3449$ para el segundo. Enfocando a $30 \beta_x$ y β_y .

En este caso (Fig. 2.5) se obtiene un haz divergente enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y por menos de 10 unidades.

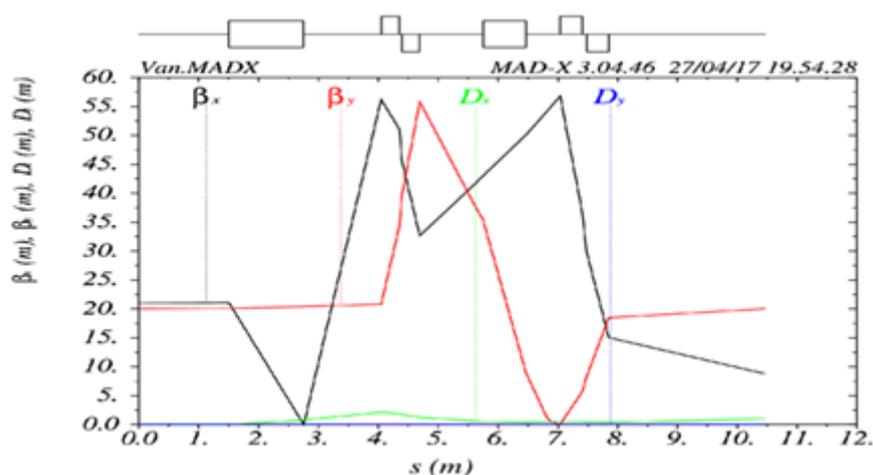


Figura 2.6: Simulación del mejor caso para obtener un haz paralelo: primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.03676$ y $k_1 = -4.91242$, para el primero y $k_1 = 3.51322$ y $k_1 = -4.91569$, para el segundo. Enfocando a $20 \beta_x$ y β_y .

En este caso (Fig. 2.6) se obtiene un haz paralelo enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y por menos de 10 unidades.

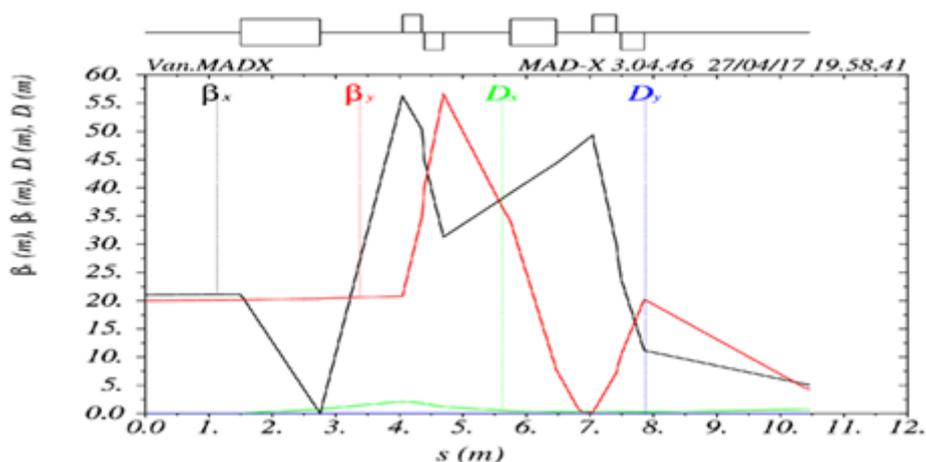


Figura 2.7: Simulación del mejor caso para obtener un haz enfocándose: primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$, para el primero y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$, para el segundo. Enfocando a menos de $10 \beta_x$ y β_y .

En este caso (Fig. 2.7) se obtiene un haz convergente enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y por menos de diez unidades.

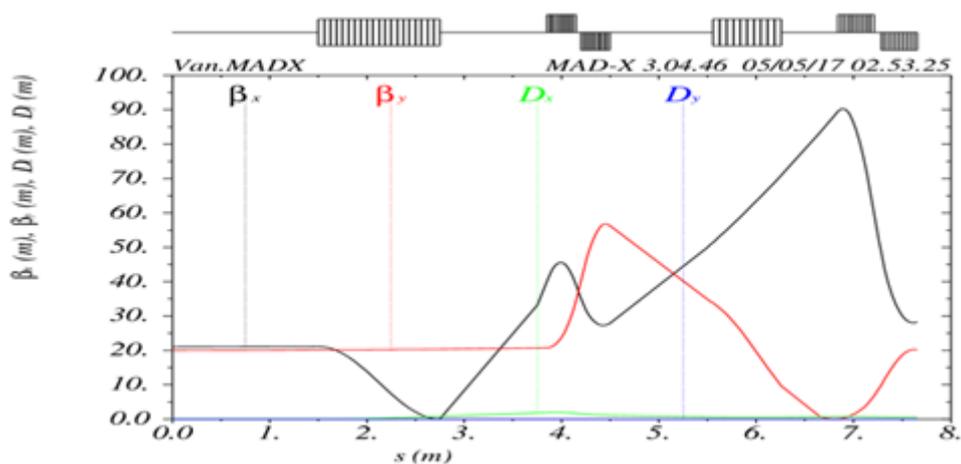


Figura 2.8: Simulación con líneas más suaves del mejor caso primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$, para el primero y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$, para el segundo. Enfocando a menos de $10 \beta_x$ y β_y y con el primer par de cuadrupolos a 1.10 metros.

En este caso (Fig. 2.8) se obtiene un haz paralelo enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y , por más de 40 unidades.

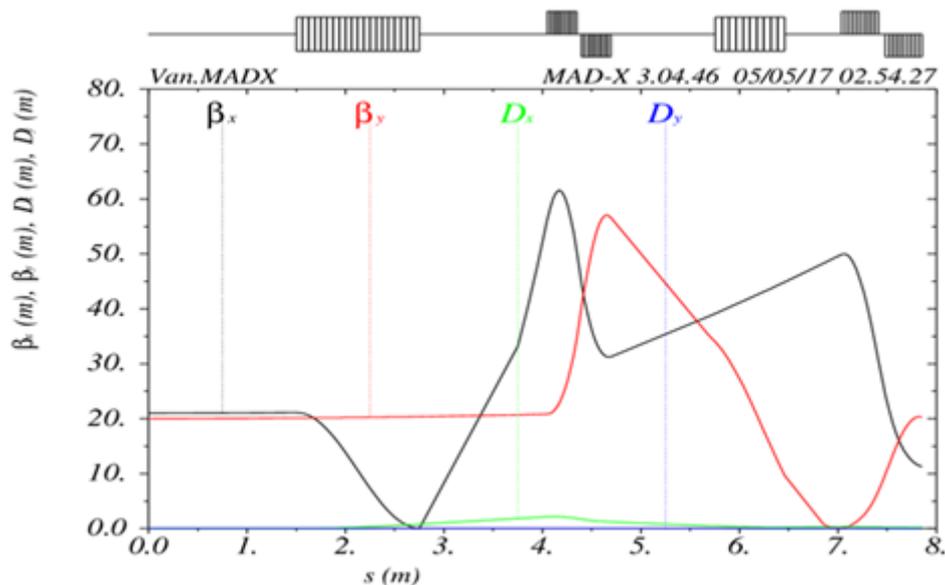


Figura 2.9: Simulación del mejor caso primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$, para el primero y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$, para el segundo. Enfocando a menos de $10 \beta_x$ y β_y y con el primer par de cuadrupolos a 1.30 m.

En este caso (Fig. 2.9) se obtiene un haz paralelo enfocado al final de la línea y se excede las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y por menos de 10 unidades.

Más adelante con ayuda del simulador TRAVEL con el que se trabajó en la Universidad Autónoma de Sinaloa, se observa que hay una gran diferencia en la evolución del haz a lo largo de la línea, esto se debe principalmente a que en el primer dipolo no se considera que este imán tiene bordes y sin éstos

sólo se afecta a una de las coordenadas, sin embargo cuando hay un borde se presentan los efectos de los campos de borde que son completamente distintos a los que se presentan en el resto del dipolo, este parámetro no lo toma en cuenta el simulador MAD-X que es el que se usó para los primeros resultados. El cálculo para los campos de borde y sus correcciones es más complicado y dado que el uso de éste software fue limitado no se realizó a detalle, sin embargo en la última figura (Fig. 2.9) se muestra un caso de la evolución completa de la línea.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de las simulaciones usando TRAVEL, se muestra el tamaño del haz y la distribución de las partículas a distintos puntos en el acelerador:

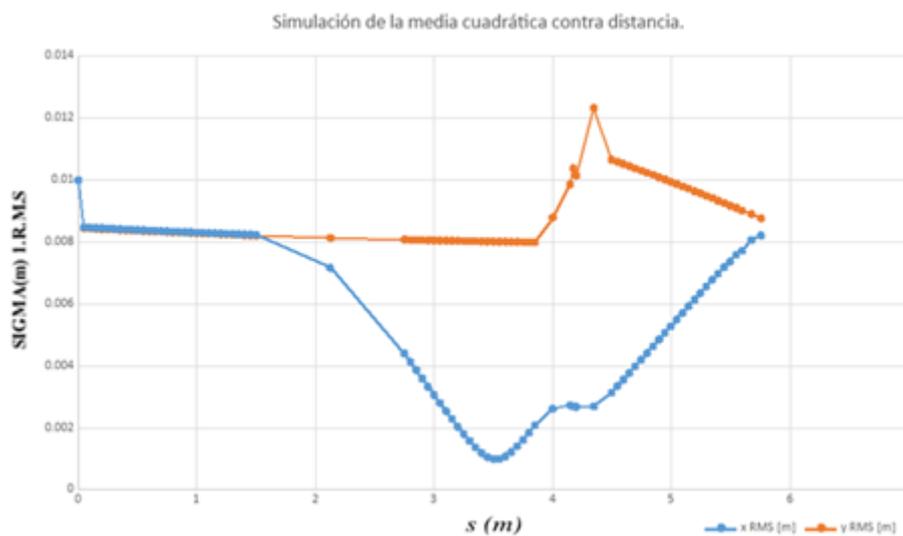


Figura 2.10: Simulación del tamaño del haz media cuadrática a través del acelerador terminando después del primer par de cuadrupolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$.

En la simulación de la Fig. 2.10, el haz se enfoca al final de la línea y no se excede el diámetro de 4 centímetros del tubo.

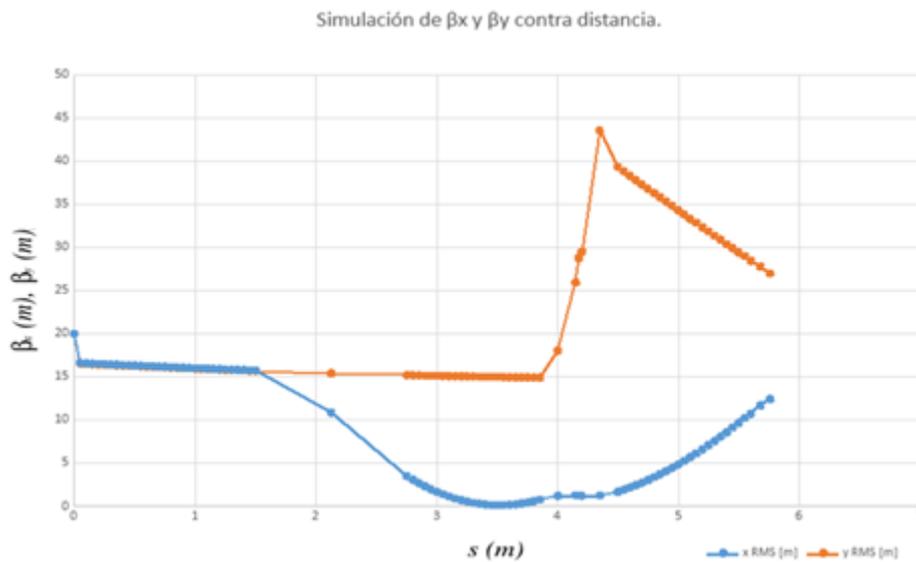


Figura 2.11: Simulación de las β_x y β_y a través del acelerador terminando después del primer par de cuadrupolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$.

En la simulación de la Fig. 2.11 se obtiene un haz enfocado al final de la línea y no se exceden las 51.2 unidades en el parámetro Twiss β_x y β_y .

En las figuras 2.12, 2.13 y 2.14 podemos ver 4 cortes distintos del haz de partículas ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo: El primer corte representa el espacio fase de la partícula en X. Para el segundo corte tenemos el espacio fase para la partícula en Y. Para el tercer corte tenemos la Potencia contra la energía de la partícula. Finalmente para el último corte tenemos la posición de las partículas en X contra Y. Además la distribución de partículas está denotada por colores según su intensidad, desde el azul al rojo, de menor a mayor concentración.

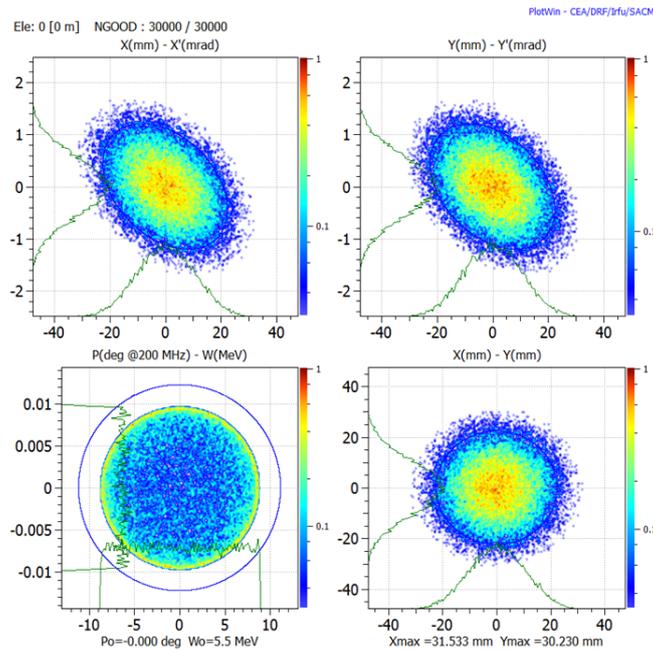


Figura 2.12: Simulación de la distribución de partículas en el haz al inicio del acelerador.

En la simulación de la Fig. 2.12 para ambos espacios fase en X y Y tenemos una forma elíptica con una mayor concentración para el centro. Para el tercer corte vemos una forma circular y una distribución homogénea de puntos. Por último en el cuarto corte se muestra cómo hay un ligero enfoque en el centro del haz y podemos notar que la forma del haz es circular.

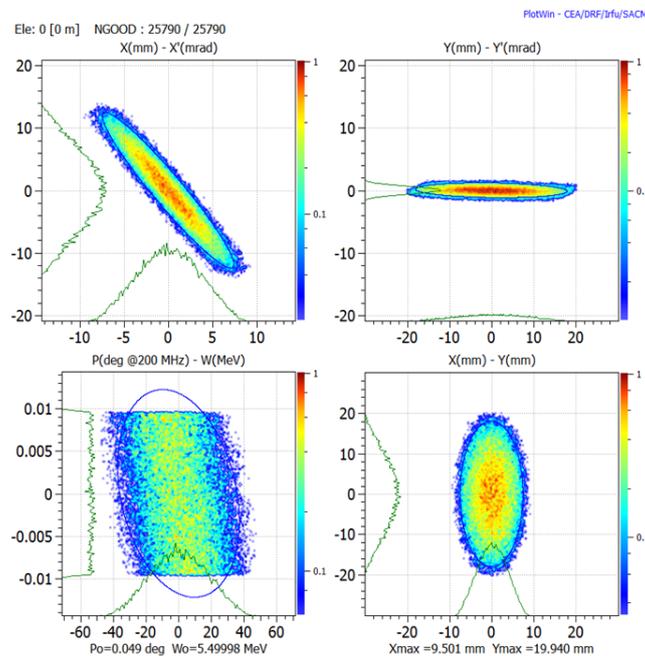


Figura 2.13: Simulación de la distribución de partículas en el haz a 20 centímetros después del primer Dipolo.

La simulación de la distribución de partículas de la Fig. 2.13, para ambos espacios fase en X y Y

tenemos una forma elíptica más achatada que en la figura 2.12 con una mayor concentración para el centro y para el segundo corte notamos la elipse ya no tiene inclinación y está recostada de manera horizontal. Para el tercer corte vemos una forma elíptica con una distribución menos homogénea en comparación con la figura 2.12. Por último en el cuarto corte se muestra cómo aún hay un ligero enfoque en el centro del haz pero la forma del haz ahora se aproxima más a una circunferencia.

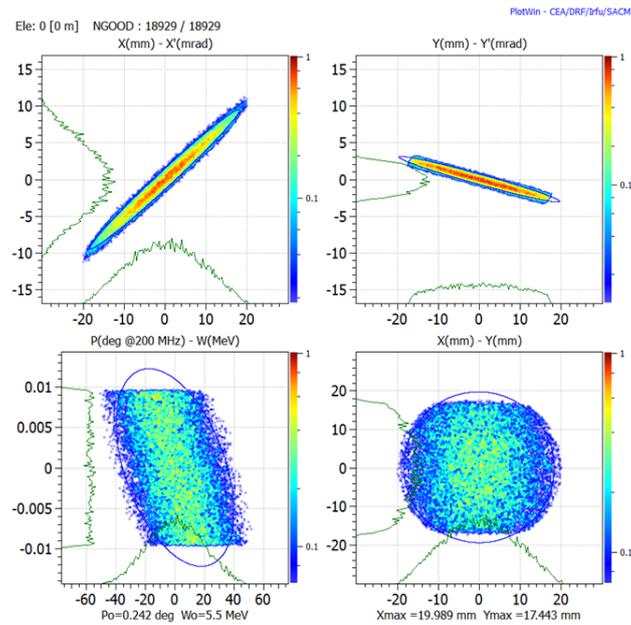


Figura 2.14: Simulación de la distribución de partículas en el haz a la entrada del segundo dipolo.

En la simulación de la distribución de partículas de la Fig. 2.14, para ambos espacios fase en X y Y tenemos una forma elíptica tan achatada como en la figura 2.13 para ambas elipses sin embargo ahora la inclinación de las elipse en el primer corte cambió de izquierda a derecha y para el segundo corte pasó de una posición horizontal a tener una inclinación a la derecha. Para el tercer corte vemos una forma elíptica con una distribución homogénea similar a la figura 2.13. Por último en el cuarto corte se ve que no hay una concentración de partículas notable en el centro, las partículas están repartidas de manera más homogénea y la forma del haz ha vuelto a tender a una forma circular.

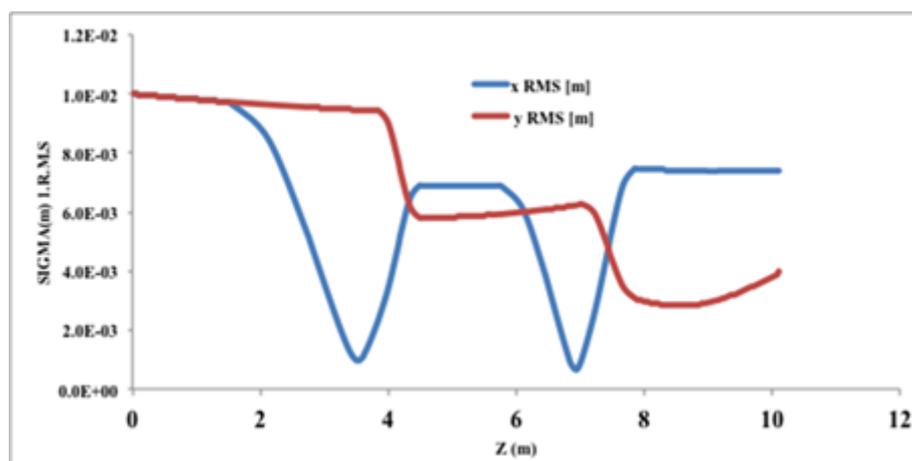


Figura 2.15: Simulación de la evolución del tamaño del haz de partículas a lo largo de toda la línea en TRAVEL.

En la simulación descrita por la figura 2.15 el haz se enfoca al final de la línea y no se excede el diámetro de 4 centímetros del tubo. El diámetro del haz no supera su valor inicial durante todo el recorrido.

De los resultados de MAD-X se concluye que la manera óptima para el arreglo de los cuadrupolos es siempre tener el positivo primero, pues la beta solo sobrepasa ligeramente los valores límite para las betas, de esta manera no se pierde tanto haz. En cuanto a la posición de los primeros dos cuadrupolos: las simulaciones en las que se separan del dipolo 20 cm más, muestran un mejor enfoque y menor pérdida de partículas. Sobre la emitancia: las simulaciones en TRAVEL muestran que el primer dipolo sólo la incrementa en un 10%, mientras que la evolución del haz por los efectos de borde muestra que es necesario usar los dipolos con polaridad invertida.

Por otra parte, no se puede determinar la posición óptima del octupolo que no se encuentra en uso pues en la simulación del MAD-X, no se aprecia un efecto y para poder simularlo con TRAVEL es necesaria más información para poder simularlo adecuadamente.

Para mejorar el transporte del haz se propone alejar el primer par de cuadrupolos 20 cm del dipolo y usar los valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$ para el primer par de cuadrupolos y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$ para el segundo para reducir la pérdida de partículas de manera óptima.

Los efectos de borde son muy importantes y muestran que el haz se sobre enfoca en una posición diferente a lo que arroja MAD-X, por lo que un estudio más profundo de los efectos de borde del magneto necesita ser aplicado para tomar los datos de TRAVEL como concluyentes. Finalmente se necesita conocer cuál es el campo magnético máximo generado por los cuadrupolos para comparar con los datos de TRAVEL.

Para despejar las dudas se propone realizar experimentos antes de alejar el cuadrupolo con estos valores, ya que no se puede simular con MAD-X la manera en que los bordes de los dipolos afectan el transporte del haz, así basados en los resultados de estos experimentos, podemos saber más de cómo afectan estos parámetros y entonces poder ofrecer un cambio con fundamentos más sólidos.

Por último, se propone obtener las dimensiones del octupolo para poder simularlo y brindar valores teóricos para su uso.

2.1.2. Montaje del dispositivo experimental: detector, lectura y digitalización

A continuación, se muestran los pasos que se siguen para iniciar la adquisición:

Se conecta el preamplificador al sistema del detector por fuera de la línea del acelerador siguiendo estos pasos:

El detector DSSSD se monta en el interior de una cámara de vacío (Fig. 2.16), utilizando atravesadores para vacío, se extraen las 32 señales del detector utilizando cables especiales para ello. Las salidas ya en aire, se conectan a un preamplificador MPR-32 de Mesytec [42], el cual integra la carga recibida por el detector, produciendo señales de cierta amplitud, tiempo de subida y tiempo de bajada. La cobertura utilizando papel aluminio que se observa en la Fig. 2.16, se utiliza para bajar el alto nivel de ruido que aparece generalmente al gestionar muchas señales (como en este caso).

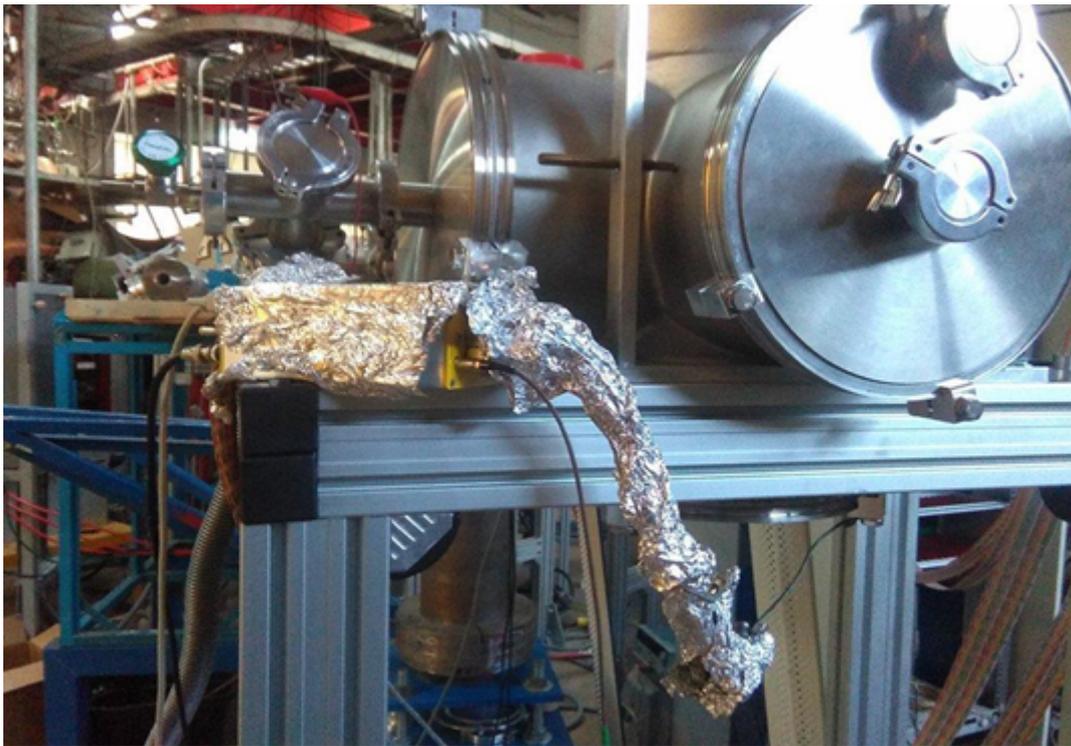


Figura 2.16: Fotografía del preamplificador conectado al detector por fuera de la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.

En la figura 2.17 se presenta la fuente de voltaje que alimenta al preamplificador, esta puede proporcionar $\pm 6V$, $\pm 12V$ y $\pm 24V$.



Figura 2.17: Fotografía de fuente de voltaje del preamplificador.

Se encendió una bomba mecánica (Fig 2.18) conectada a la línea y se esperó a tener un vacío de 10^{-3} mbar. Esta bomba crea un vacío en la línea necesario para que las partículas del aire no interactúen

con el detector ni con cualquier fuente radioactiva que se coloque dentro de la línea.



Figura 2.18: Fotografía de la bomba mecánica de vacío de la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.

Se montan las tarjetas de módulo FEBEX3 sobre una base con ventiladores (Fig 2.19) que deben encenderse siempre antes que las tarjetas para mantenerlas frías, ya que estas tienden a subir drásticamente su temperatura y el no tenerlas a una temperatura regulada puede dañarlas, afectando su funcionamiento parcial o permanentemente.

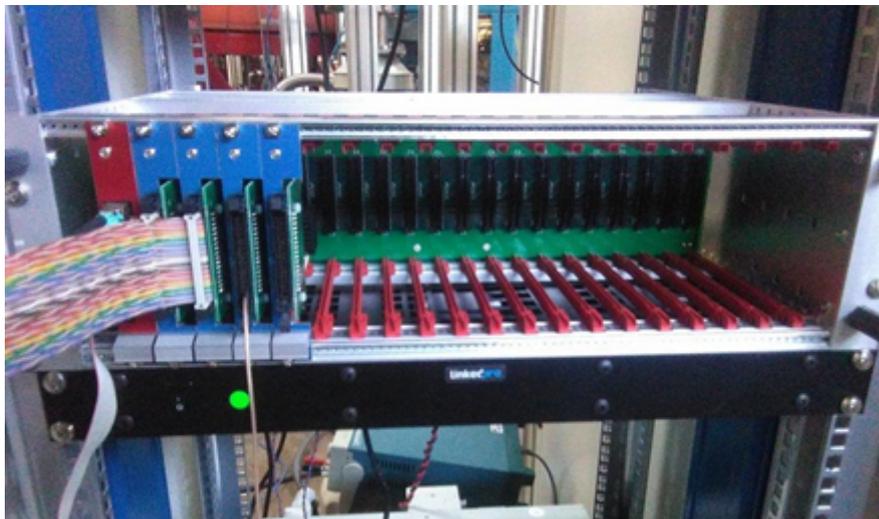


Figura 2.19: Fotografía de las tarjetas: Módulo FEBEX3 sobre un ventilador.

Se conecta y enciende una fuente de alimentación a las tarjetas para alimentarlas, asegurándose de que tuvieran un voltaje alrededor de 40V con una corriente de 1.15A (Fig. 2.20). En este caso se trata de una fuente TDK-Lambda que opera con voltajes de entre 0V y 60V, con una corriente de hasta 25A [45].

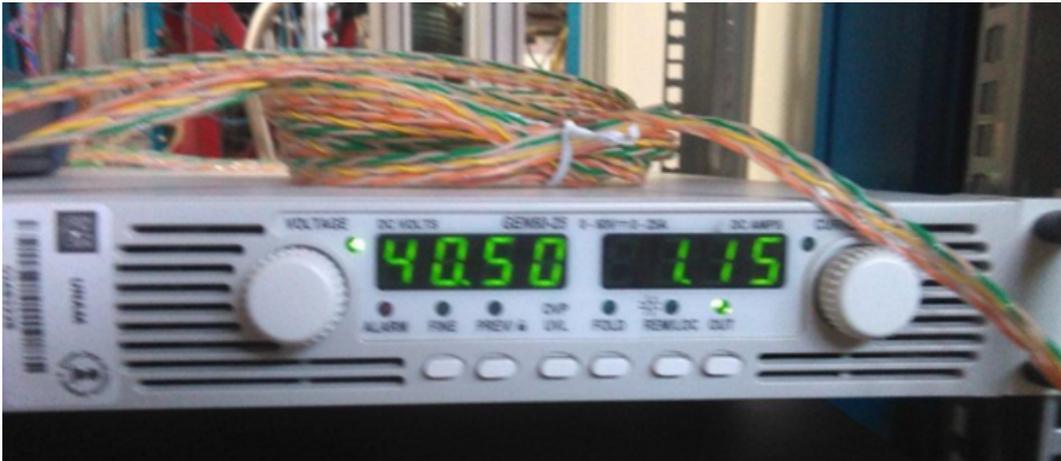


Figura 2.20: Fotografía de la fuente TDK-LAMBDA de alimentación de las tarjetas.

Se conecta la fuente de alto voltaje al detector, se enciende y baja gradualmente el voltaje hasta -26V . El preamplificador (Fig. 2.16) funciona con diferentes voltajes de su fuente de alimentación: $+6\text{V}$, $+12\text{V}$ y -6V (Fig. 2.17 y Fig. 2.21), una vez conectado al detector y encendida su fuente este induce un voltaje de bias en el detector, que como se explicó en el capítulo 1, induce una diferencia de potencial entre las caras P y N del detector y así mejora su eficiencia de recolección de carga.



Figura 2.21: Fotografía de las fuentes de alimentación para un fototubo (izquierda), fuente del detector y generador de pulsos (centro) y fuente del preamplificador (derecha).

Se enciende la fuente (Fig. 2.23) que alimenta al módulo azul EXPLODER (Fig. 2.22). La fuente en este caso es un modelo Tektronix PWS4602 que proporciona un voltaje de entre 0V y 60V a una corriente que llega a los 2.5A . Una vez conectada la fuente al módulo se deben proporcionar 12V con una corriente de 2A para que este opere [39, 43].

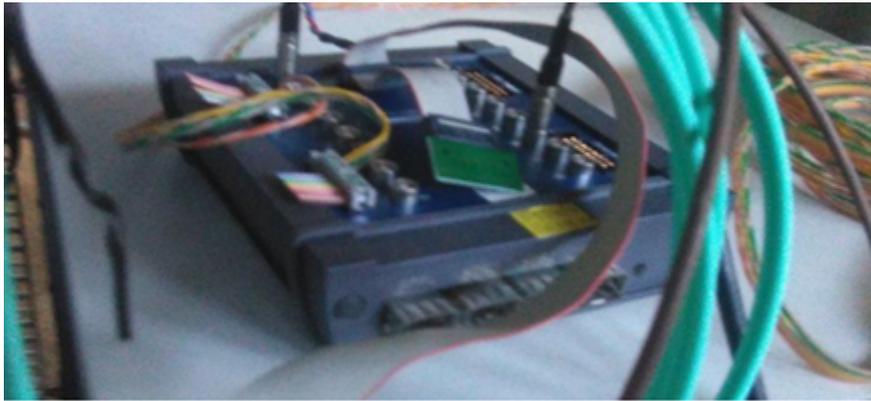


Figura 2.22: Fotografía del módulo EXPLODER conectado a la computadora principal y al módulo FEBEX.



Figura 2.23: Fotografía de la fuente Tektronix PWS4602 de alimentación del módulo EXPLODER.

Se encienden dos computadoras con las que se controla el sistema de adquisición. La computadora principal (Fig 2.24) se encuentra montada en el gabinete (o crate por su traducción al inglés) y aunque es la que controla el sistema las órdenes se dan desde una segunda computadora que debe estar conectada a la principal a través de un cable ethernet. Mediante el comando `ssh lipc - 1` desde una terminal en la segunda computadora se adquiere control de la principal. Los pasos para iniciar la adquisición se encuentran a detalle en el fragmento del manual de usuario en el capítulo 4.



Figura 2.24: Fotografía de la computadora principal vista desde atrás con sus respectivas conexiones de VGA al monitor, un cable ethernet a la segunda computadora, el módulo EXPLODER y el cable de alimentación.

2.1.3. Pruebas de vacío

Para las pruebas de vacío la bomba mecánica (Fig 2.18) llega a un vacío medio de 10^{-3} mbar que se considera aceptable para las pruebas a realizar. En la figura 2.25 se muestra el medidor de vacío senTorr Gauge Controller que muestra en mbar el vacío obtenido en el panel TC2 [44].



Figura 2.25: Fotografía del medidor de vacío conectado a la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.

2.1.4. Sistema de detección de partículas Alfa

Se coloca la fuente triple alfa en el portablancos frente al detector DSSSD (Fig. 2.26). El preamplificador cuenta con un módulo de 16 canales, una salida diferencial de 100 ohms y puede amplificar por un factor de 5.

Una vez listo el dispositivo experimental (fuente triple y cableado del detector), se inicia la adquisi-

ción de datos.

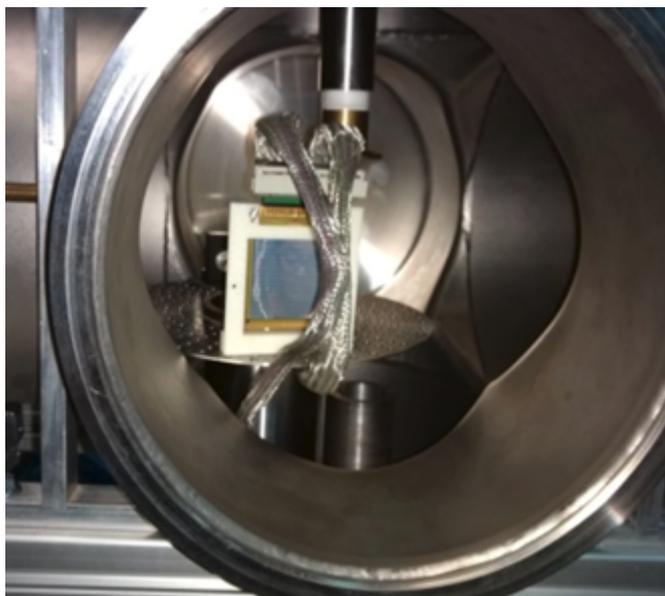


Figura 2.26: Fotografía de la vista al detector montado dentro de la cámara de bombardeo de la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.

2.1.5. Detección de un haz de partículas

La radiación emitida por la fuente triple alfa es detectada por cada strip del detector y se genera una señal de carga que se lee con el preamplificador y es digitalizada por el sistema de adquisición de datos.

2.1.6. Análisis experimental

A continuación, se muestran los resultados de la toma de datos de dos días de la fuente triple alfa con el detector DSSSD :

2.1.6.1. Obtención de datos del detector DSSSD, visualizados con Go4

Para el detector DSSSD se usó el software de monitorización Go4 descrito en el capítulo anterior (Fig 2.27) que proporciona los histogramas de las partículas detectadas en cada línea del detector y su canal que es proporcional a la energía que tienen.

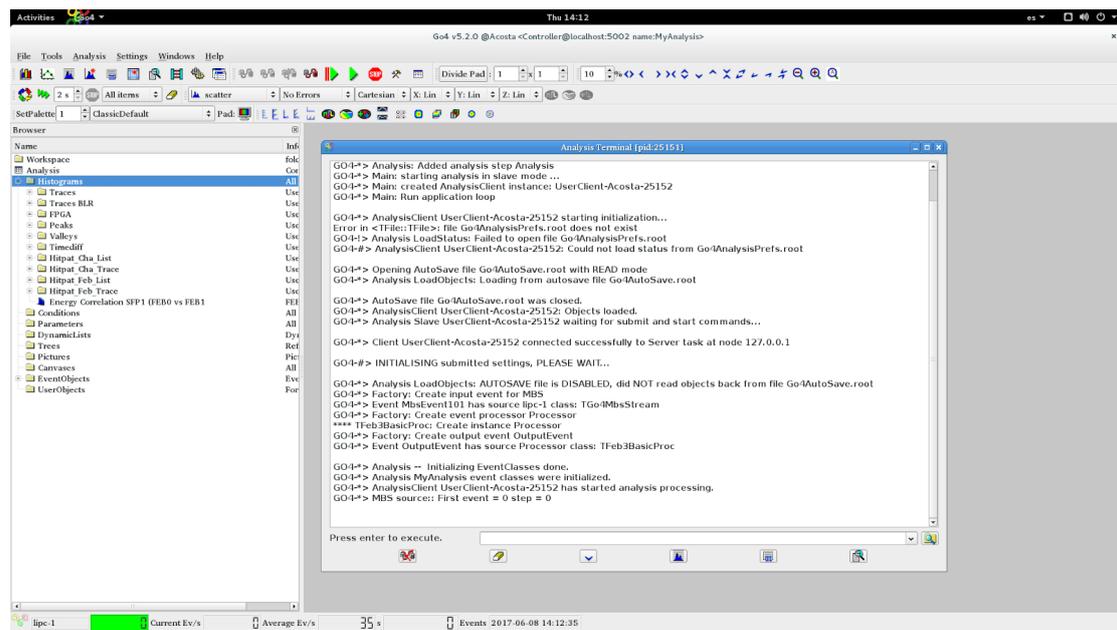


Figura 2.27: Captura de pantalla del software de monitorización Go4.

2.1.6.2. Distribución de eventos por canal

Al tener 16 canales verticales y 16 horizontales, los eventos pueden observarse en 32 espectros de energía (donde en el eje Y se observa el canal que se relaciona con la amplitud del pulso ésta con la energía de la partícula detectada). Los bloques de 16 señales del Preamplificador se conectan directamente mediante cables planos de 34 pines, a las tarjetas diferenciales de FEBEX, siempre en bloques de 16. Los espectros de energías pueden verse utilizando como sistema de monitorización el programa Go4 y a su vez, pueden salvarse como archivos del entorno de análisis ROOT [27].

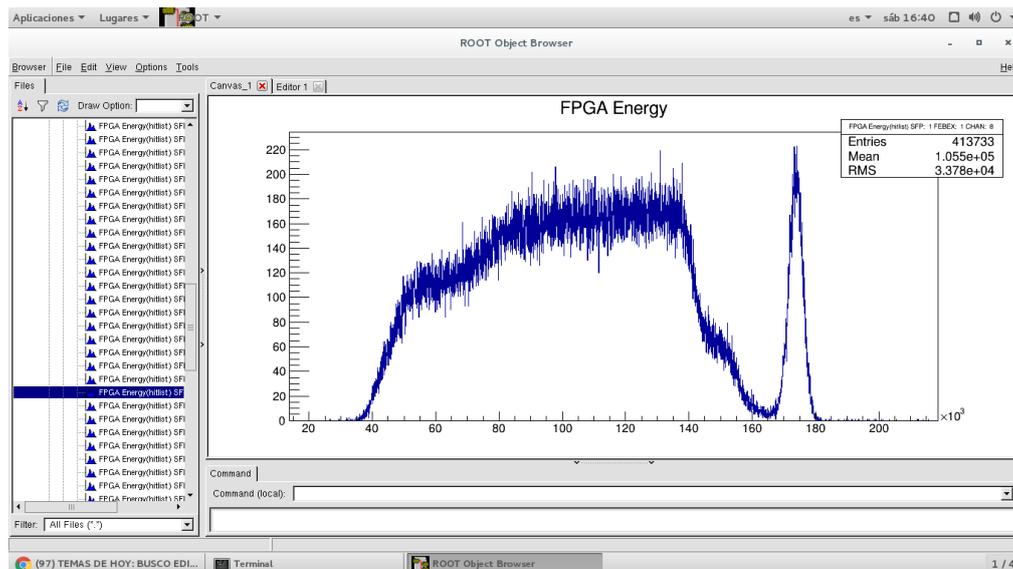


Figura 2.28: Ejemplo de un histograma visto en ROOT.

Como se puede apreciar en la Figura 2.28 en el histograma de un sólo canal podemos ver todas las cuentas detectadas. En el espectro usado como ejemplo, puede verse un pico de protones dispersados en oro y una serie de estructuras correspondientes a la dispersión de protones en el material de vidrio en el que fue depositado el blanco de oro.

2.1.6.3. Registro de datos.

En el sistema MBS (ver capítulo 1), el método de guardar los datos adquiridos es a través de archivos “lmd”, el acrónimo para List Mode Data, en este tipo de archivos cada evento y el tiempo preciso en el que ocurren se guardan de manera secuencial, de esta manera es posible reconocer coincidencias en la detección de dos detectores distintos y así obtener, por ejemplo, las coordenadas de cada partícula depositada en un detector.

Este tipo de archivos se encuentran encriptados por lo que no es posible leer la información directamente. Por ello, en este trabajo, no se usaron directamente archivos lmd, en lugar de ello se utilizó la opción de Go4 de guardar la estadística acumulada en histogramas del entorno del programa ROOT. Esto no permite realizar un análisis detallado del experimento, pues los histogramas no pueden desempaquearse de manera secuencial. Sin embargo, podemos extraer la información necesaria para este trabajo, relacionada con la resolución de los detectores probados y la integración de los picos adquiridos.

2.1.6.4. Distribución de eventos por cuadrante

Al estar colocados los canales del detector de manera vertical y horizontal con una cara frontal y otra trasera con las coincidencias obtenidas en los archivos LMD podemos asignar coordenadas a cada partícula depositada en el detector, de manera que tengamos una distribución de cada evento en 256 cuadrantes o pixeles en lugar de los 32 canales, lo cual daría una mejor aproximación de la posición de la fuente y la dispersión de las partículas emitidas por ésta. Como se explicó en el inciso anterior, esta prueba no se realiza para este trabajo.

2.1.7. Determinación de Resoluciones Energéticas

Al analizar los histogramas se identifican los picos en cada uno de los eventos en los canales de cada toma de datos y se relacionan con la energía teórica esperada para cada pico. Con ayuda de ROOT se identifica la desviación típica definida por σ y a través de la siguiente aproximación se obtiene la anchura a media altura (FWHM) de los picos con más datos para determinar la resolución:

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\text{Ln}2}\sigma \approx 2.35482\sigma \quad (8)$$

2.1.8. Cálculo de la sección eficaz diferencial de Rutherford

Para una colisión elástica se deben tomar los principios de conservación de energía y momento y complementarlos con un modelo para la fuerza que actúa durante la colisión entre el proyectil y las masas. En la mayoría de los casos ésta fuerza suele ser bien aproximada por la repulsión Coulombiana mientras la distancia entre los núcleos sea grande comparada con las dimensiones del núcleo, pero pequeña en comparación con el radio de Bohr $a_0 = 0.53\text{Å}$. Bajo estas condiciones y si $M_1 \ll M_2$ podemos usar la siguiente ecuación para calcular la sección eficaz diferencial de Rutherford [15].

$$\frac{d\sigma}{d\sigma_c} = \left[\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_c \sin^2(\frac{\vartheta_c}{2})} \right]^2 \quad (9)$$

Dónde el subíndice c indica que los valores dados están en el sistema de referencia del centro de masa, Z_1 es el número atómico del proyectil de masa atómica M_1 , Z_2 es el número atómico del proyectil de masa atómica M_2 , e es la carga del electrón ($e = -1.602 \times 10^{-19}\text{C}$), E es la energía del proyectil justo antes de la dispersión y ϑ_c es el ángulo con el que se dispersan los protones visto desde el detector.

En la figura 2.29 se muestra el diagrama del arreglo experimental. Los valores que se usaron son $Z_1 = 1$, $Z_2 = 79$, $E_c = 2.0\text{MeV}$ y $\vartheta_c = 105^\circ$. Dando así un valor de $\frac{d\sigma}{d\sigma_c} = 1496.132 [\text{fm}^2]$ ó $14.961 [\text{barns}]$.

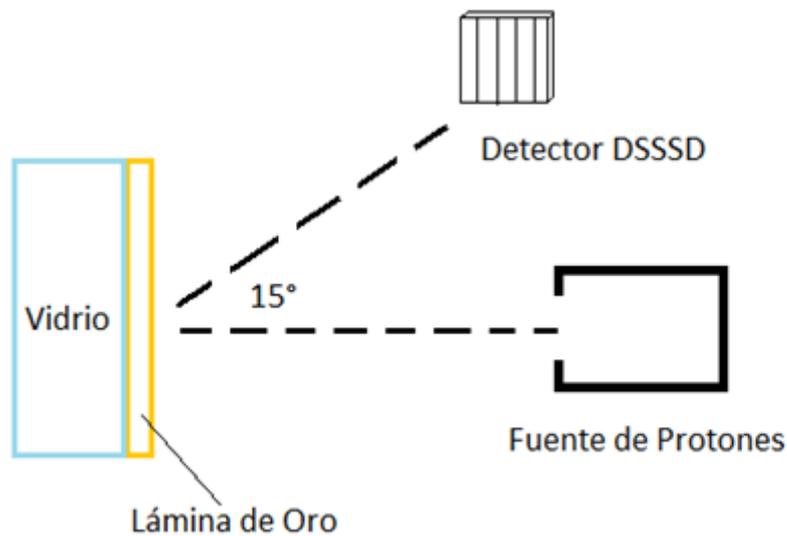


Figura 2.29: Diagrama del arreglo experimental para la detección de protones dispersados por una placa de oro.

Capítulo 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se mostrarán los histogramas obtenidos con Go4 y su análisis, sin embargo, debido a la gran cantidad de histogramas que se analizaron se presentarán en este trabajo sólo el par más claro por cada adquisición de datos. En la mayoría de estos histogramas aparece la etiqueta FPGA Energy, por sus siglas en inglés Field-Programmable Gate Array Energy, esto hace referencia al dispositivo programable con el que se trabaja para calcular la energía. También es importante resaltar que los histogramas representantes de la cara P del detector muestran valores positivos para los canales mientras que los de la cara N muestran valores negativos, esto simplemente porque Go4 identifica una cara con carga positiva y la otra con carga negativa y lo representa de esta manera.

Estos primeros histogramas (Fig. 3.1 y Fig. 3.2) corresponden a la primera adquisición de datos, en particular del canal 5, de las dos que se realizaron. Podemos apreciar la presencia de los tres pares de picos correspondientes al Curio, Americio y Plutonio en ambos, además de un cuarto pico en la cara positiva (Fig. 3.1) que aparece en todos los canales positivos. Este cuarto pico a menor energía es espurio. Por la forma, parece ser un reflejo del conteo del pico de mayor energía (en este caso el ^{244}Cm). Este pico se observa sólo en la cara P. Al hacer la coincidencia (Fig. 3.3) automáticamente desaparece pues se trata de una reflexión. Dado que probamos con otros sistemas de adquisición, descubrimos que el pico no depende de FEBEX, por lo que concluimos que es un defecto en la cara P del detector, probablemente debido a la inducción de carga del anillo de guardia del detector en todas las strips. Cabe aclarar que las cuentas en los espectros del lado P, aparecen con el eje de energía (eje X) en negativo, para poder diferenciarlos del lado N. Una modificación realizada en el archivo de control de mbs y Go4 que puede cambiarse fácilmente (Ver Apéndice Tabla 1 y 2 para la ubicación y anchura a media altura de los picos de la toma de datos).

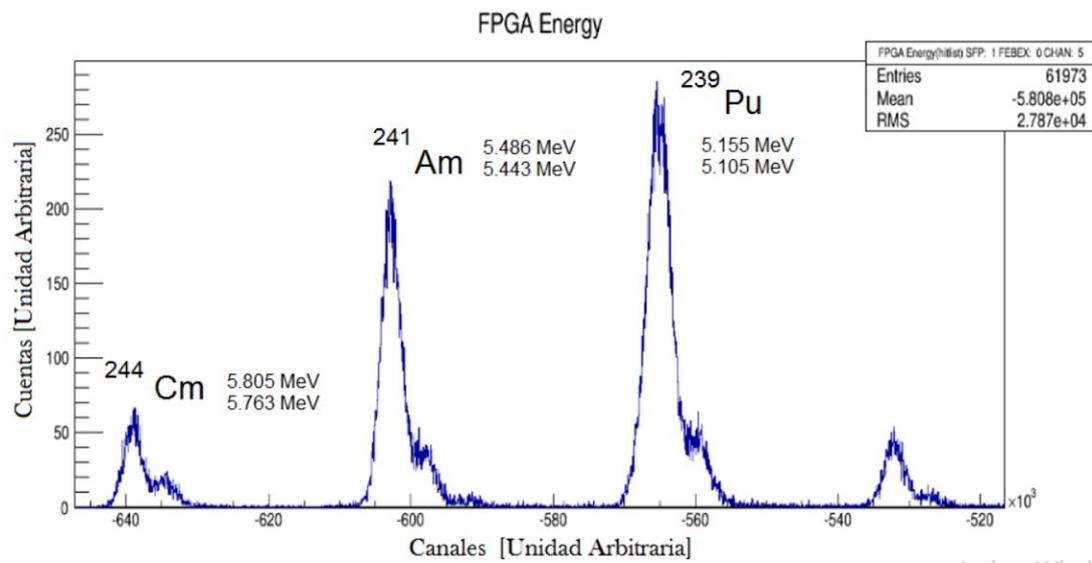


Figura 3.1: Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara P.

En este histograma (Fig. 3.1) se obtienen dos picos para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en el canal 5 de la cara P junto con un cuarto par de picos que aparecen en todos los canales de la cara P. Se aprecian 61973 eventos, una media de -580800 y media cuadrática de 27870 .

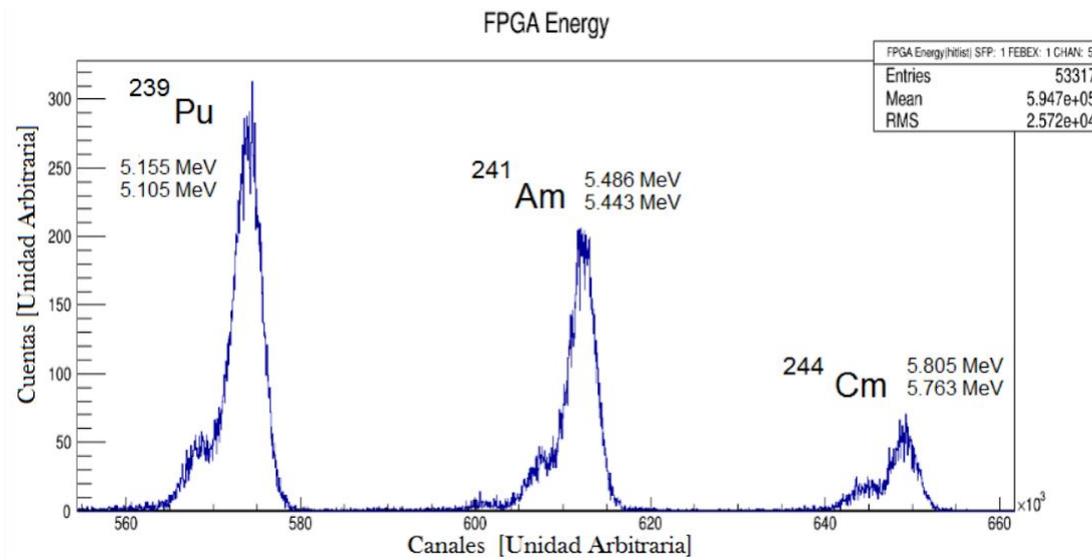


Figura 3.2: Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara N.

En este histograma (Fig. 3.2) se obtienen dos picos para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en el canal 5 de la cara N. Se aprecian 53317 eventos, una media de 594700 y media cuadrática de 25720 .

Con un par de histogramas podemos obtener la correlación de energía entre las dos caras en un canal (Fig. 3.3):

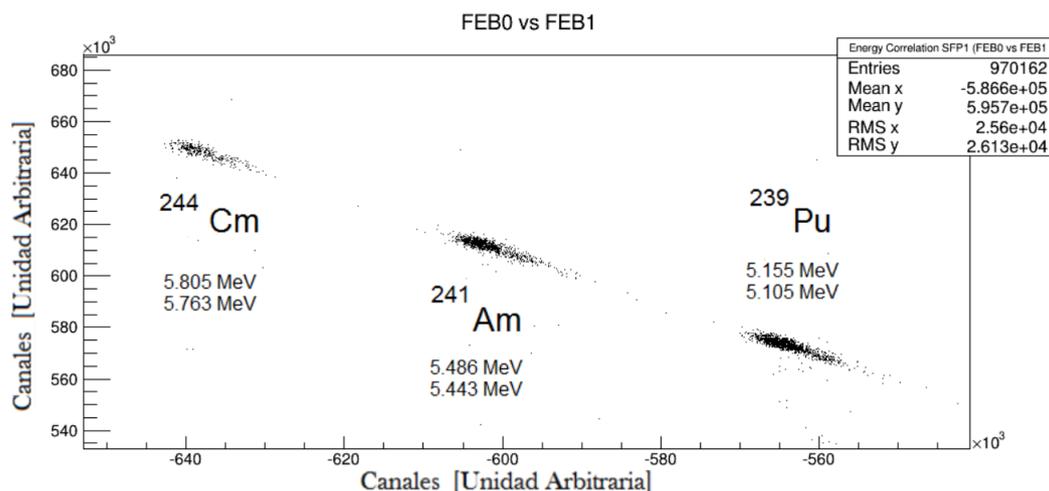


Figura 3.3: Correlación de energía entre la cara P y N para un sólo canal.

En esta correlación (Fig. 3.3) se identifican el ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu correspondientes al canal 5 en ambas caras. Se aprecian 970162 entradas, una media en x de -586600, una media en y de 595700, una media cuadrática en x de 25600 y una media cuadrática en y de 261300.

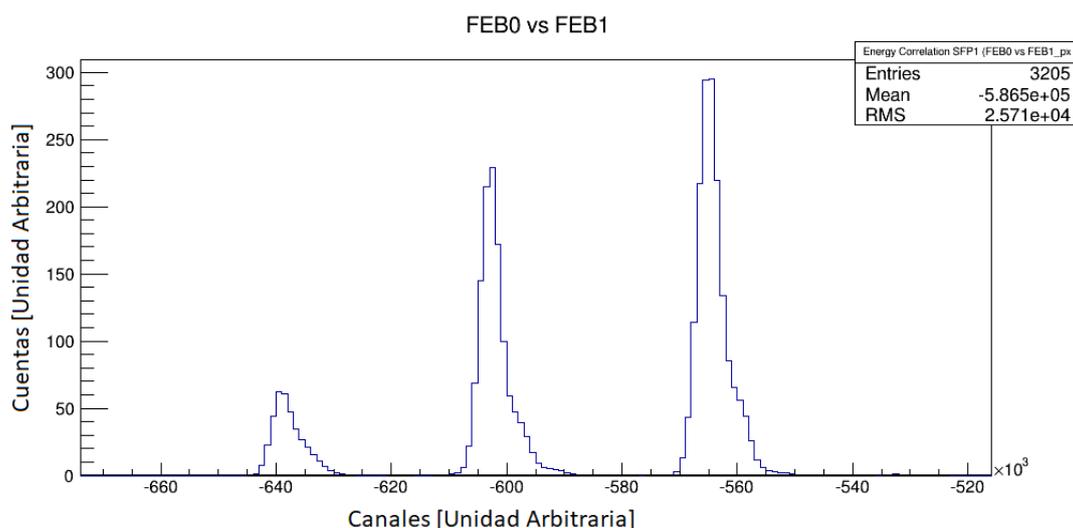


Figura 3.4: Proyección en X de la correlación de energía.

El histograma de la figura 3.4 es la proyección del histograma bidimensional de la figura 3.3. En este histograma, como es de esperarse, recuperamos los tres picos de la fuente alfa para un pixel en particular, relativo a la intersección de los canales 5P y 5N, para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu . Se aprecian 3205 eventos, una media de -586500 y media cuadrática de 25710.

Los siguientes histogramas (Fig. 3.5 y Fig. 3.6) corresponden a la segunda toma de datos, en particular del canal 5, de las dos que se realizaron. En estos casos se aprecian los picos correspondientes al Curio, Americio y Plutonio pero no se pueden diferenciar los dos picos que hay en cada elemento. Se aprecia de

nuevo un cuarto pico en la cara positiva en todos los canales positivos. El empeoramiento en la resolución del detector se debe a un accidente que sufrió el sistema de vacío, dejando entrar aceite a la cámara, lo que provocó suciedad en la superficie del detector y la cantidad de entradas aumentó en casi un orden de magnitud. Decidimos no omitir estos resultados, pues denotan la fragilidad del sistema ante los posibles cambios en la presión y la posible presencia de agentes externos (como el aceite que produce el sistema de bombeo de aire al exterior).

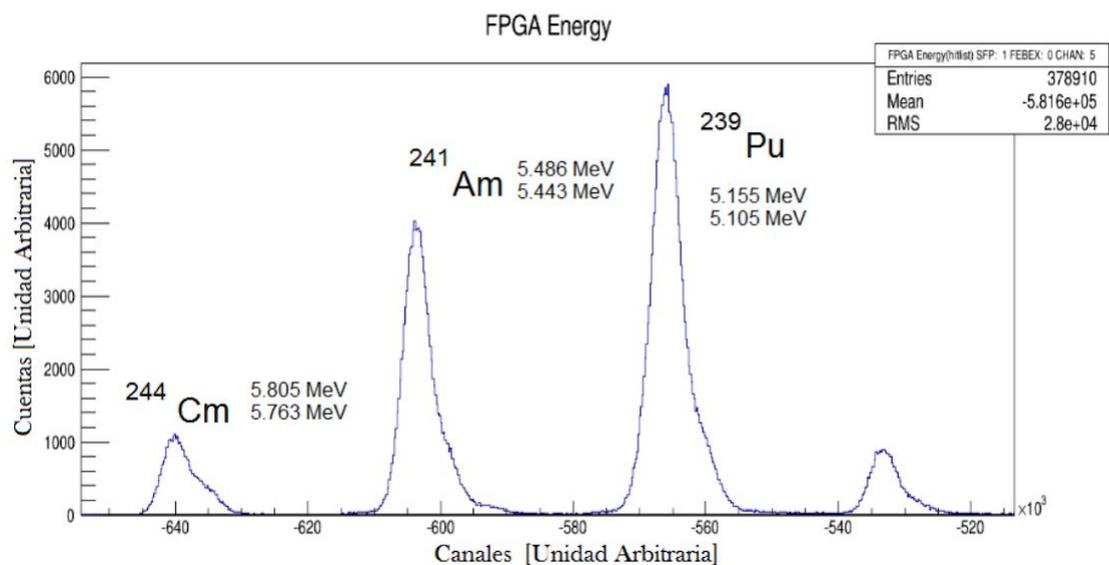


Figura 3.5: Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara P.

En este histograma (Fig. 3.5) se obtienen los picos para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en el canal 5 de la cara P junto con un cuarto par de picos que aparecen en todos los canales de la cara P. Se aprecian 378910 eventos, una media de -581600 y media cuadrática de 28000 (Ver Apéndice Tabla 3 y 4).

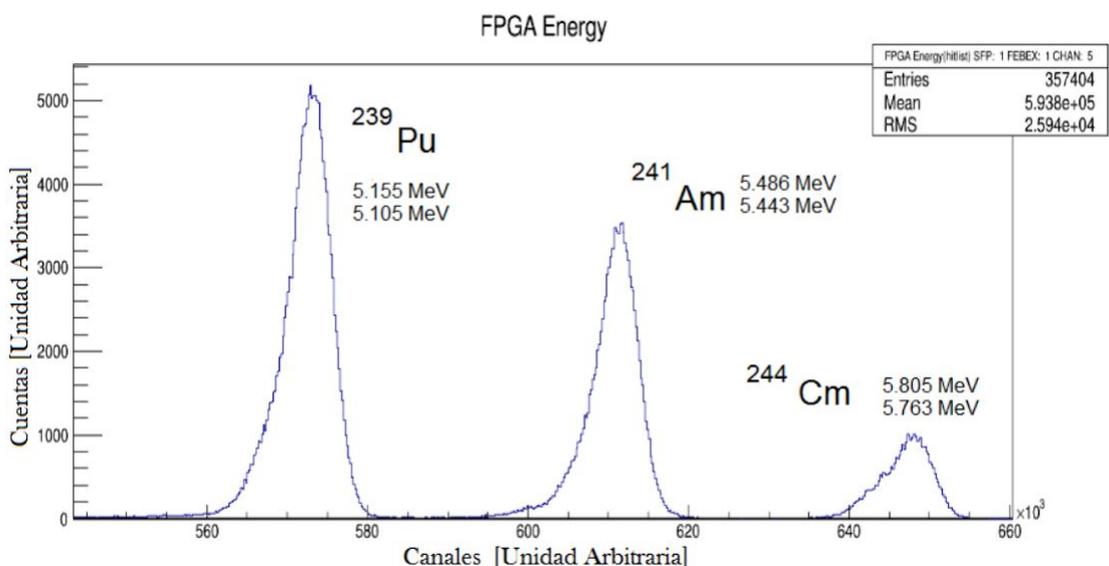


Figura 3.6: Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara N.

En este histograma (Fig. 3.6) se obtienen los picos para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en el canal 5 de la cara N. Se aprecian 357404 eventos, una media de 593800 y media cuadrática de 25940 (Ver Apéndice Tabla 5 y 6).

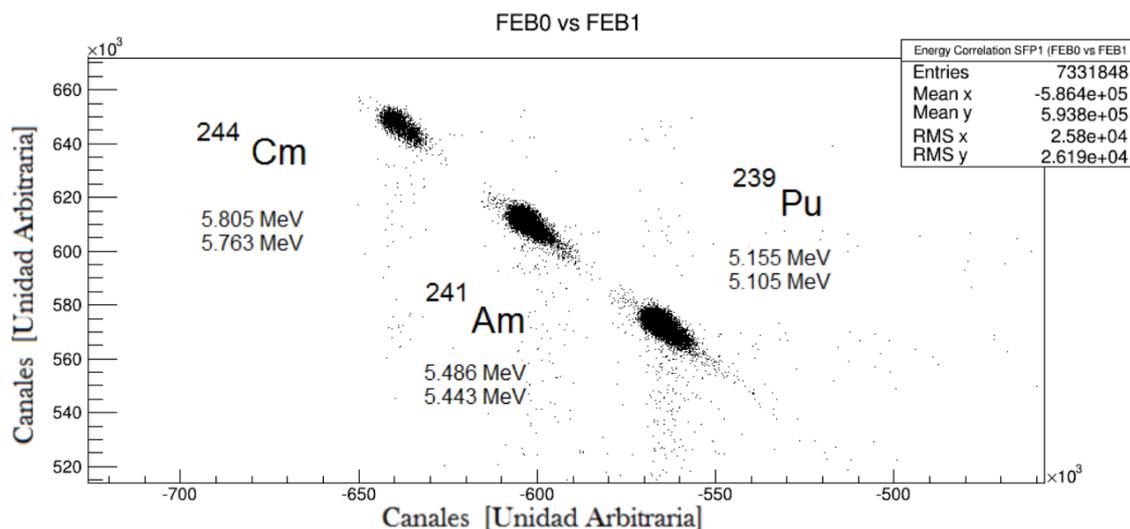


Figura 3.7: Correlación de energía entre la cara P y N para un sólo canal.

En esta correlación (Fig. 3.7) se identifican el ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu correspondientes al canal 5 en ambas caras. Se aprecian 7331848 eventos, una media en x de -586400, una media en y de 593800, una media cuadrática en x de 25800 y una media cuadrática en y de 26190.

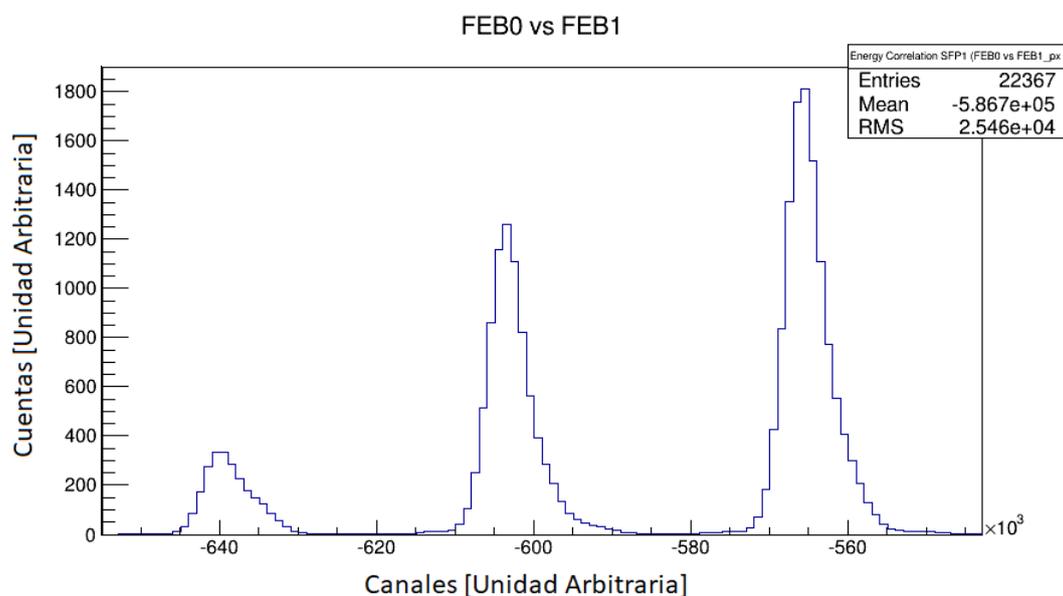


Figura 3.8: Proyección en X de la correlación de energía.

En este histograma (Fig. 3.8) de la correlación anterior se obtiene la proyección de los picos para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu correspondientes al canal 5 en ambas caras. Se aprecian 22367 entradas, una

media de -586700 y media cuadrática de 25460.

Los siguientes histogramas (Fig. 3.9 y Fig. 3.10) corresponden a la toma de datos del ^{137}Cs y el ^{60}Co con un detector de Germanio ORTEC previamente descrito.

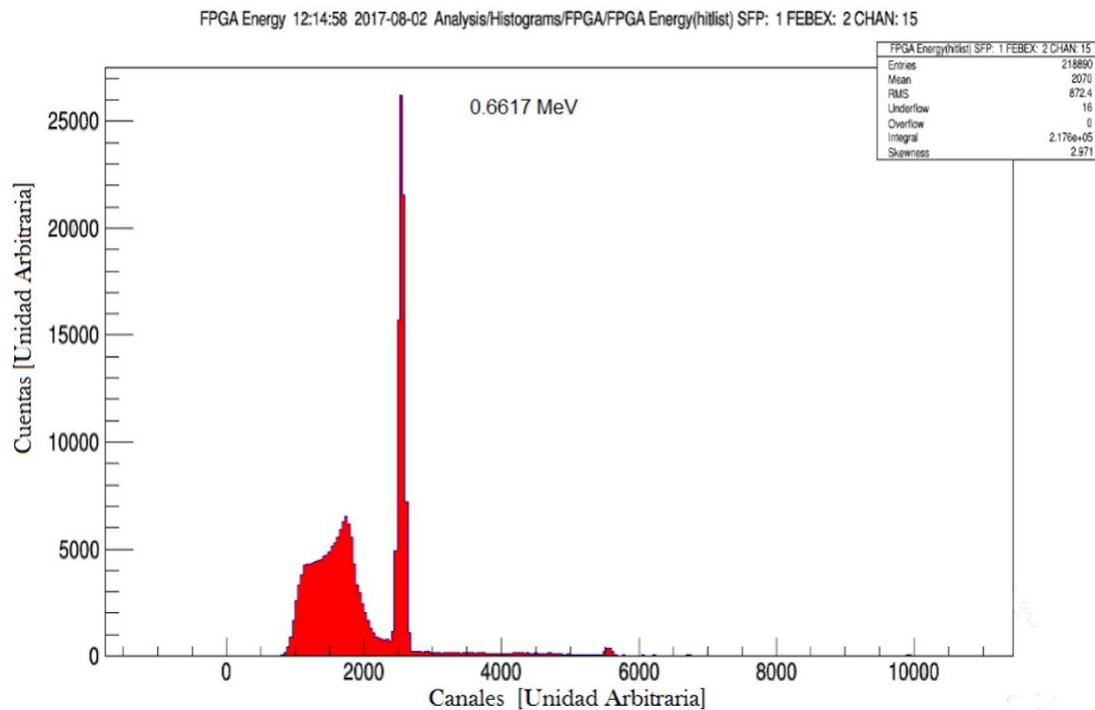


Figura 3.9: Histograma de Cuentas vs Canales para ^{137}Cs .

En este histograma (Fig. 3.9) se distingue el hombro Compton y pico fotoeléctrico del ^{137}Cs junto con un pico al final que corresponde a dos rayos gammas generados por el decaimiento del isotopo detectados al mismo tiempo. Se aprecian 218890 entradas, una media de 2070 y media cuadrática de 872.4.

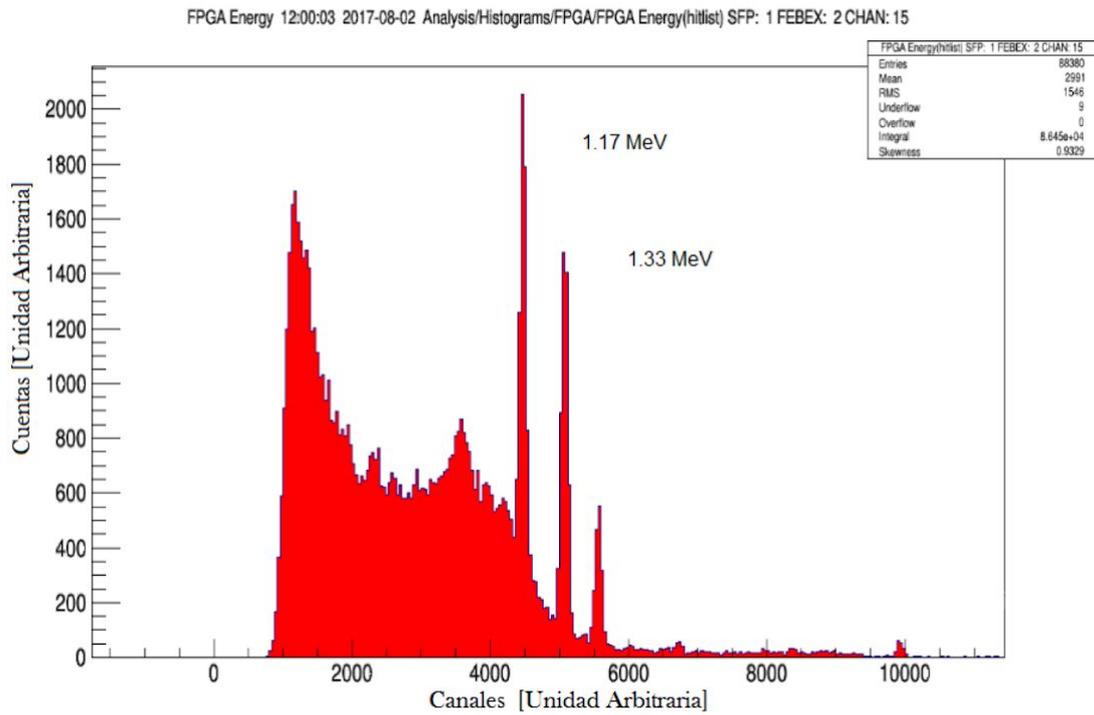


Figura 3.10: Histograma de Cuentas vs Canales para ^{60}Co .

En este histograma (Fig. 3.10) se distingue el hombro Compton y picos fotoeléctricos del ^{60}Co junto con un pico al final que corresponde a dos rayos gammas generados por el decaimiento del isótopo detectados al mismo tiempo. Se aprecian 88380 eventos, una media de 2991 y media cuadrática de 1546.

Los siguientes histogramas (Fig. 3.11 y Fig. 3.12) corresponden a la toma de datos de un haz de protones de 2 MeV para el experimento de la sección eficaz de Rutherford.

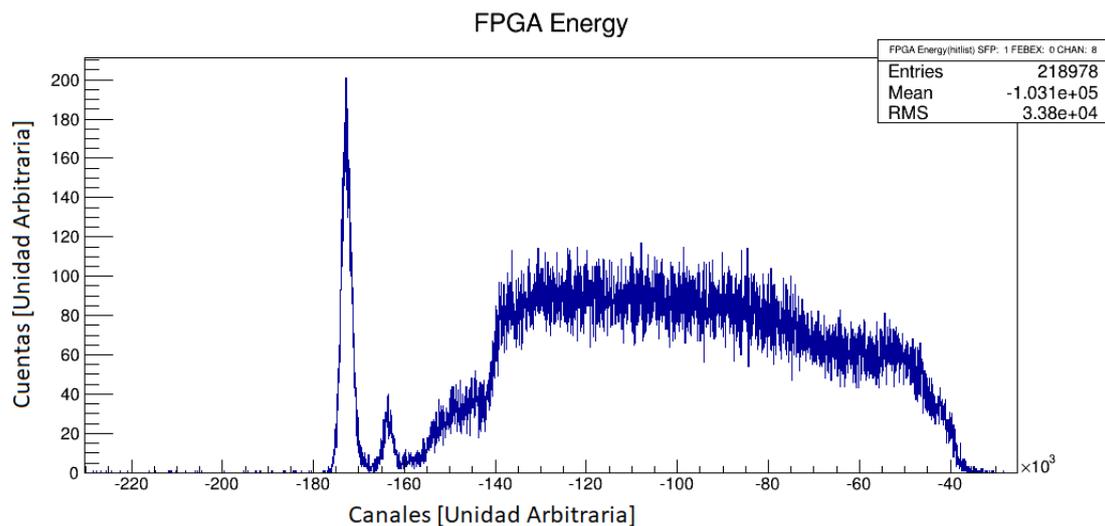


Figura 3.11: Histograma de Cuentas vs Canales para protones dispersados por oro en la cara P.

En este histograma (Fig. 3.11) correspondiente al canal 8 de la cara P, se obtiene el pico asociado a los

protones que se ven dispersados por la delgada capa de oro, después los dos escalones que corresponden al silicio y oxígeno, sabemos que son estos elementos pues son los componentes fundamentales del vidrio. Se aprecian 218978 eventos, una media de -103100 y media cuadrática de 33800. Comparando con la siguiente figura (Fig. 3.11) observamos que el pico pequeño vuelve a ser una reflexión debida a defectos en el detector DSSSD (Ver Apéndice Tabla 7 y 8).

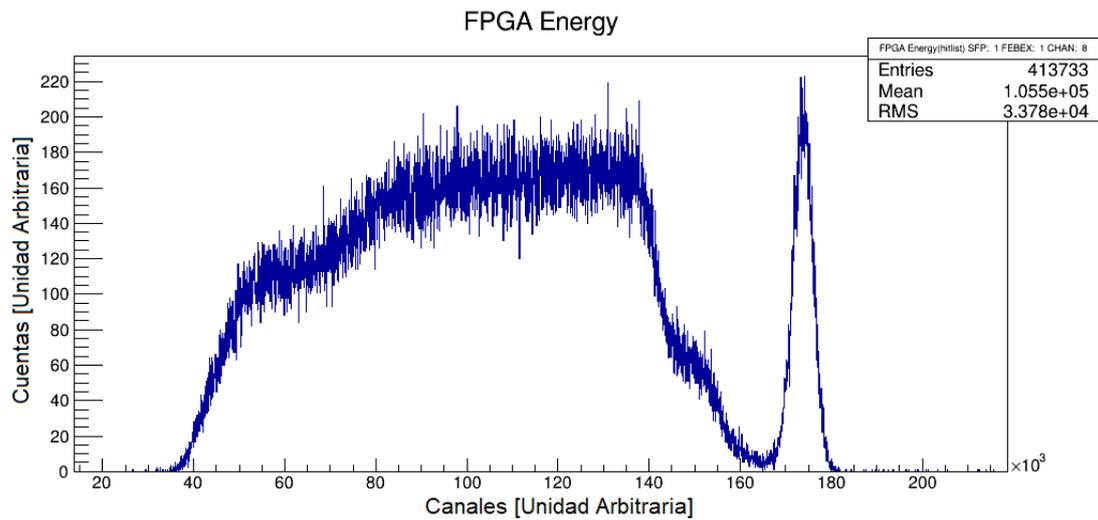


Figura 3.12: Histograma de Cuentas vs Canales para protones dispersados por oro en la cara N.

En este histograma (Fig. 3.12) correspondiente al canal 8 de la cara N, se obtiene el pico asociado a los protones que se ven dispersados por la delgada capa de oro y después los dos escalones que corresponden al silicio y oxígeno, sabemos que son estos elementos pues son los componentes fundamentales del vidrio. Se aprecian 413733 eventos, una media de 105500 y media cuadrática de 33780 (Ver Apéndice Tabla 9 y 10).

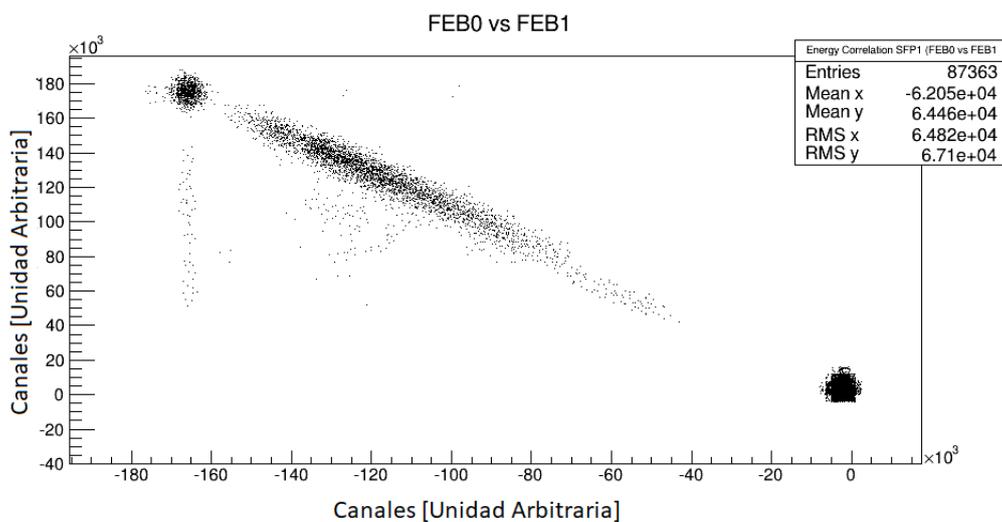


Figura 3.13: Correlación de energía entre la cara P y N para un sólo canal.

En esta correlación (Fig. 3.13) se identifica el pico asociado a los protones que se ven dispersados por la delgada capa de oro y después los escalones con menos detalle que corresponden al silicio y oxígeno, sabemos que son estos elementos pues son los componentes fundamentales del vidrio. Se aprecian 87363 entradas, una media en x de -62050, una media en y de 64460, una media cuadrática en x de 64820 y una media cuadrática en y de 67100. El cúmulo de eventos cercanos a cero son los eventos de ruido acumulados en las dos tiras en comparación.

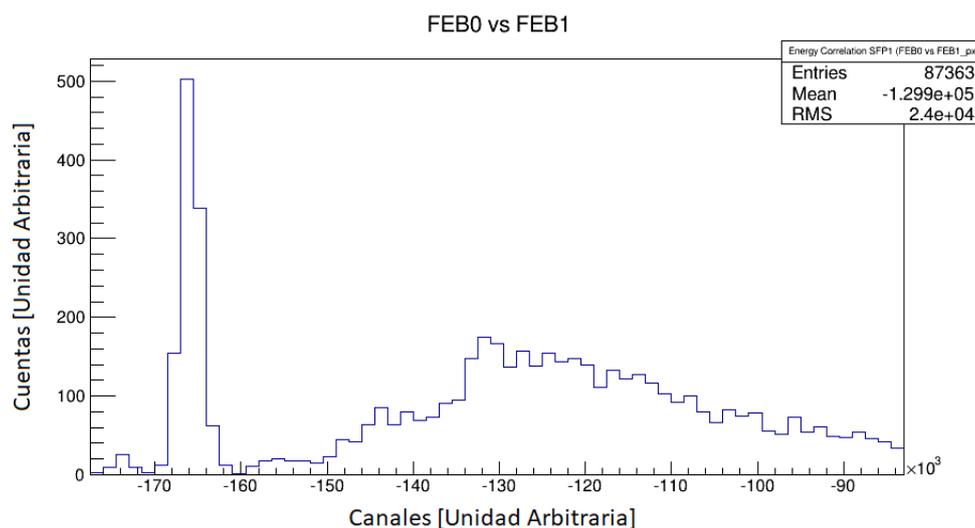


Figura 3.14: Proyección en X de la correlación de energía.

En este histograma (Fig. 3.14) se aprecia la proyección de la correlación, dónde observamos la estadística para un pixel, en el que esperamos se reproduzca de nuevo el patrón de dispersión de los espectros monodimensionales de cada canal. Se identifica el pico asociado a los protones que se ven dispersados por la delgada capa de oro y después los escalones que corresponden al silicio y oxígeno, sabemos que son estos elementos pues son los componentes fundamentales del vidrio. Se aprecian 87363 eventos, una media de -129900 y una media cuadrática de 24000.

3.1. El DSSSD utilizado para determinar la posición de una fuente

A continuación, se muestra la distribución de eventos por canal en la cara P y N de la primera toma de datos:

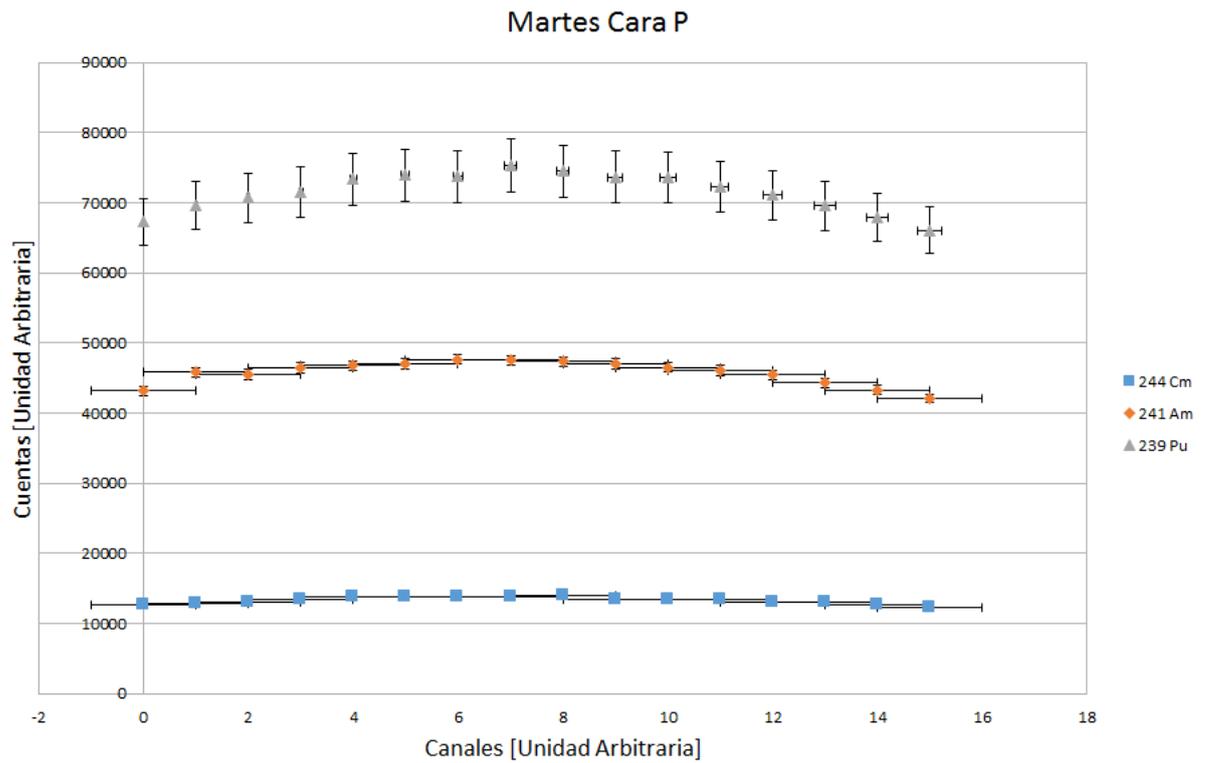


Figura 3.15: Histograma de la distribución de eventos por canal en la cara P.

En este histograma (Fig. 3.15) de la primera toma de datos se distingue el mayor número de eventos registrados para el ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en el canal 7 de la cara P.

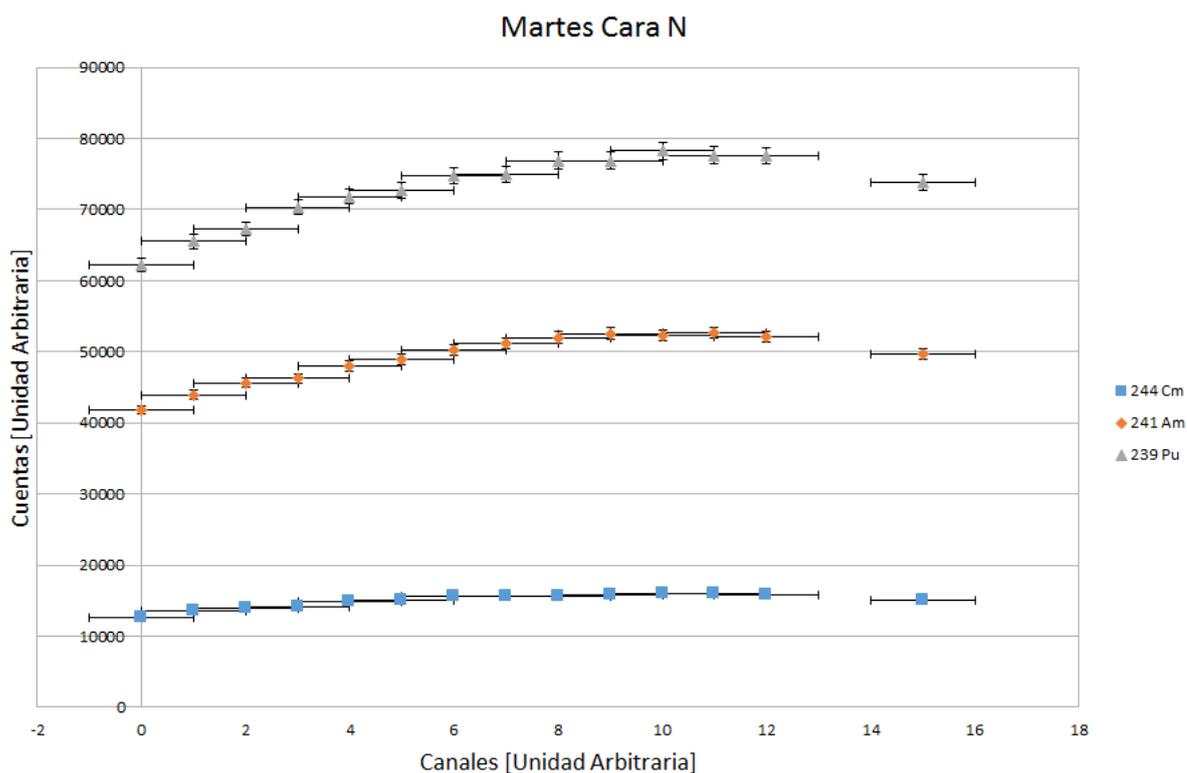


Figura 3.16: Gráfica de los picos integrados para la cara N del detector.

En este histograma (Fig. 3.16) de la primera toma de datos se distingue el mayor número de eventos registrados para el ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en el canal 10 de la cara N.

En los gráfico de las figuras 3.15 y 3.16 se puede ver la integración de los distintos picos de cada canal o tira del DSSSD. La forma de la curva denota la posición del detector con respecto a la fuente. Las tiras son horizontales en la cara N, y se cuentan de abajo hacia arriba, por lo que podemos observar que la fuente está posicionada ligeramente más alta con respecto al centro del detector, por ello hay más cuentas en los canales 10 y 11. Dado que el máximo número de cuentas en los picos de la cara P están en la tira 7, podemos ubicar la fuente centrada en el pixel (7,10), es decir centrada en Y y ligeramente encima del centro en X.

3.2. Comparación de las resoluciones obtenidas

Las siguientes tablas muestran la anchura a media altura y errores en de los picos con más eventos en cada toma de datos para determinar su resolución.

Tabla 3.1 Datos de la anchura a media altura para la fuente triple alfa en las caras P y N de un DSSSD.

Fuente Triple Alfa Primera Toma	FWHM (keV)	Error (keV)
Cara P Canal 6	40.4	0.041
Cara N Canal 6	36.5	0.030
Fuente Triple Alfa Segunda Toma	FWHM (keV)	Error (keV)
Cara P Canal 6	53.6	0.009
Cara N Canal 6	53.2	0.006

En la tabla 3.1 notamos para la primera toma de datos una anchura a media altura de 40.400 ± 0.041 keV para el canal 6 de la cara P y de 36.500 ± 0.030 keV para el canal 6 de la cara N y para la segunda toma de datos, después del accidente que deterioró la resolución, una anchura a media altura de 53.600 ± 0.009 keV para el canal 6 de la cara P y de 53.200 ± 0.006 keV para el canal 6 de la cara N.

Tabla 3.2 Datos de la anchura a media altura para Cobalto 60 y Cesio 137 en las caras P y N de un DSSSD.

⁶⁰ Co	FWHM (keV)	Error (keV)
Pico 1	44.209	0.002
Pico 2	35.365	0.026
¹³⁷ Cs	FWHM (keV)	Error (keV)
Pico 1	30.656	0.001

En la tabla 3.2 notamos para la toma de datos del ⁶⁰Co una anchura a media altura de 44.209 ± 0.002 keV para el primer pico y de 35.365 ± 0.026 keV para segundo pico y para la toma de datos del ¹³⁷Cs una anchura a media altura de 30.656 ± 0.001 keV para el único pico.

Tabla 3.3 Datos de la anchura a media altura para protones dispersados por oro en las caras P y N de un DSSSD.

Protones de 2 MeV	FWHM (keV)	Error (keV)
Cara P Canal 8	35.1	0.004
Cara N Canal 8	67.3	0.004

En la tabla 3.3 notamos para la toma de datos con protones con una energía de 2 MeV deflectados en oro una anchura a media altura de 35.100 ± 0.004 keV para el canal 8 de la cara P y de 67.300 ± 0.004 keV para el canal 8 de la cara N.

Capítulo 4

CONSTRUCCIÓN DEL MANUAL DE USUARIO

Para facilitar el uso de FEBEX3 en el Instituto se escribió un manual que se puede encontrar en la computadora conectada a éste sistema. Es importante seguir los pasos a detalle cómo están en el manual pues se puede dañar el detector o quemar las tarjetas. El manual tiene distinción por colores para facilitar la comprensión de los pasos que se deben seguir, lo que hace cada paso y lo que se debe mostrar en pantalla si se ingresa lo correcto en la terminal de la computadora. En negro están escritos los comandos que se deben ingresar en la terminal, en rojo una explicación o comentario de la función de cada comando y en azul la respuesta de la terminal a los comandos en caso de que dé una.

Dado que la primera parte del manual se dedica a la descripción de los componentes de la cadena electrónica y FEBEX, que ya se han descrito con detalle en capítulos anteriores, en esta parte mostramos exclusivamente la segunda parte del manual, dedicada a la puesta en marcha del sistema para la toma de datos, la monitorización y el almacenaje de datos:

TERMINAL 1

```
>ssh lipc-1 % Este comando nos da control sobra la computadora del crate.  
Linux lipc-1 3.2.0-4-686-pae 1 SMP Debian 3.2.65-1 i686  
>cd mbsrun/x86_4ebian/febex3/  
% Este comando es para entrar a la carpeta dónde están los archivos que vamos a usar.  
>sh pexheal.sh % Este comando hace un reset local.  
WRITE: bar0 offset (bytes): 0x21044, data: 0xf  
WRITE: bar0 offset (bytes): 0x21044, data: 0x0  
>goc -i 1 1 % Este comando es para verificar que la tarjeta 1 esté activa, este comando debe repetirse  
si nos da algún error.  
mbspex: initialize SFP chain 1 with 1 slaves...
```

```

Error 5 on initializing channel 1, maxdevices 1 - Input/output error
ó
mbspex: initialize SFP chain 1 with 1 slaves... done!
>goc -i 1 4 % Este comando es para verificar que el resto de las tarjetas estén activas.
mbspex: initialize SFP chain 1 with 4 slaves... done!
>resl %Este comando hace un reset local.
— Reset node LIPC-1
ls: cannot access /tmp/shm/*: No such file or directory
LIPC-1: Create and clear DAQ status...
LIPC-1: Create new message files...
— Reset node LIPC-1 finished
>mbs % Este comando indica que queremos usar mbs.
c_path: /mbs/v62/bin_PCx86_Linux_3.2_Deb
c_task: m_msg_log
mbs>-LIPC-1 :msg_log : Messageloggerunning
>@startup % Este comando inicia la adquisición.
-LIPC-1 :util:task mstarted
-LIPC-1 :util:setup file setup.usf successfully loaded
-LIPC-1 :util:cleared daqstatus counter
-LIPC-1 :util :trigger module set up as MASTER, crate nr: 0
-LIPC-1 :util:disabled interrupt
-LIPC-1 :readmeb:Pipe type 3: mmap at /dev/pexor for base 0x40000000
-LIPC-1 :transport :starting server in inclusive mode
-LIPC-1 :dispatch :->'sleep 1 '
-LIPC-1 :transport :waiting for client (port 6000)
-LIPC-1 :streamserv:task m_stream_serv started
-LIPC-1 :read_meb :task m_read_meb started
-LIPC-1 :collector:task m_collector started
-LIPC-1 :dispatch :->'sleep 1 ' finished
mbs>-LIPC-1 :stream_serv : NOclient(asynch),keepnone,scale = 1
-LIPC-1 :collector :old flushtime: 10
-LIPC-1 :collector :new flushtime: 1
-LIPC-1 :util :start acquisition
-LIPC-1 :read_meb :found trig type 14 == start acquisition
-LIPC-1 :read_meb :sfp pattern: 0x2
-LIPC-1 :read_meb :SFP id: 4, Pexor SFP physical memory base: 0x 0
-LIPC-1 :read_meb :

```

```

-LIPC-1 :read_meb :mbspex: initialize SFP chain 1 with 4 slaves...
-LIPC-1 :read_meb : done!
-LIPC-1 :read_meb :
-LIPC-1 :read_meb :
-LIPC-1 :read_meb :
-LIPC-1 :read_meb :SFP: 1, FEBEX/EXPLODER: 0
-LIPC-1 :read_meb :addr offset: buf0: 0x0, buf1: 0x100000
-LIPC-1 :read_meb :No. channels: 17
-LIPC-1 :read_meb :channel addr offset: 0x8000
-LIPC-1 :read_meb :————— ->set silicon (standard) energy filter parameters (200, 32,
201) for SFP: 1, FEBEX3: 0
-LIPC-1 :read_meb :SFP: 1, FEBEX/EXPLODER: 1
-LIPC-1 :read_meb :addr offset: buf0: 0x0, buf1: 0x100000
-LIPC-1 :read_meb :No. channels: 17
-LIPC-1 :read_meb :channel addr offset: 0x8000
-LIPC-1 :read_meb :—————
->set silicon (standard) energy filter parameters (200, 32, 201) for SFP: 1, FEBEX3: 1
-LIPC-1 :read_meb :SFP: 1, FEBEX/EXPLODER: 2
-LIPC-1 :read_meb :addr offset: buf0: 0x0, buf1: 0x100000
-LIPC-1 :read_meb :No. channels: 17
-LIPC-1 :read_meb :channel addr offset: 0x8000
-LIPC-1 :read_meb :————— ->set bgo (special) energy filter parameters (64, 40, 65)
for SFP: 1, FEBEX3: 2
-LIPC-1 :read_meb :SFP: 1, FEBEX/EXPLODER: 3
-LIPC-1 :read_meb :addr offset: buf0: 0x0, buf1: 0x100000
-LIPC-1 :read_meb :No. channels: 17
-LIPC-1 :read_meb :channel addr offset: 0x8000
-LIPC-1 :read_meb :————— ->set silicon (standard) energy filter parameters (200, 32,
201) for SFP: 1, FEBEX3: 3
-LIPC-1 :read_meb :diff pipe base phys-virt: 0xc7aa6000
-LIPC-1 :collector :acquisition running
-LIPC-1 :stream_serv:192.168.1.1 connected
-LIPC-1 :stream_serv:received CLOSE, client disconnected!
-LIPC-1 :stream_serv:192.168.1.1 connected
-LIPC-1 :read_meb
:—————
-LIPC-1 :read_meb :nr of triggers processed: 1000000

```

```

-LIPC-1 :read_meb :
-LIPC-1 :read_meb :trigger type 1 found 999999 times
-LIPC-1 :read_meb :trigger type 14 found 1 times
-LIPC-1 :read_meb :FEBEX - TRIVA trigger type mismatches: 0
-LIPC-1 :read_meb :channel data size errors (trig. type 1): 0
-LIPC-1 :read_meb :channel data size errors (trig. type 3): 0
-LIPC-1 :read_meb :trace header lec mismatches 0
-LIPC-1 :read_meb :trace trailer lec mismatches 0
-LIPC-1 :read_meb :
-LIPC-1 :read_meb :re-initialized FEBEX modules 0 times
-LIPC-1 :read_meb :gossip error count: 0
-LIPC-1 :read_meb:_____

```

Con los comandos anteriores adquirimos control de la segunda computadora e iniciamos el proceso de adquisición.

TERMINAL 2

```

>.go4login % Este comando es para iniciar el programa go4.
Configure Go4 v5.2.0 at /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/analysis/go4/502-00
>cd mbsrun/x86_64ebian/febex3/go4
% Este comando es para entrar a la carpeta dónde están los archivos que vamos a usar en la compu-
tadora que está en la mesa.
>go4 % Este comando es para abrir go4.
Go4 v5.2.0, build with ROOT 5.34/36 and Qt 4.8.6
Gtk-Message: Failed to load module canberra-gtk-module
Using Qt settings at /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/.config/GSI/go4.conf (default)

```

Una vez en el programa, aparecerá la siguiente pantalla (Fig 4.1) en la que debemos seleccionar Launch Analysis:

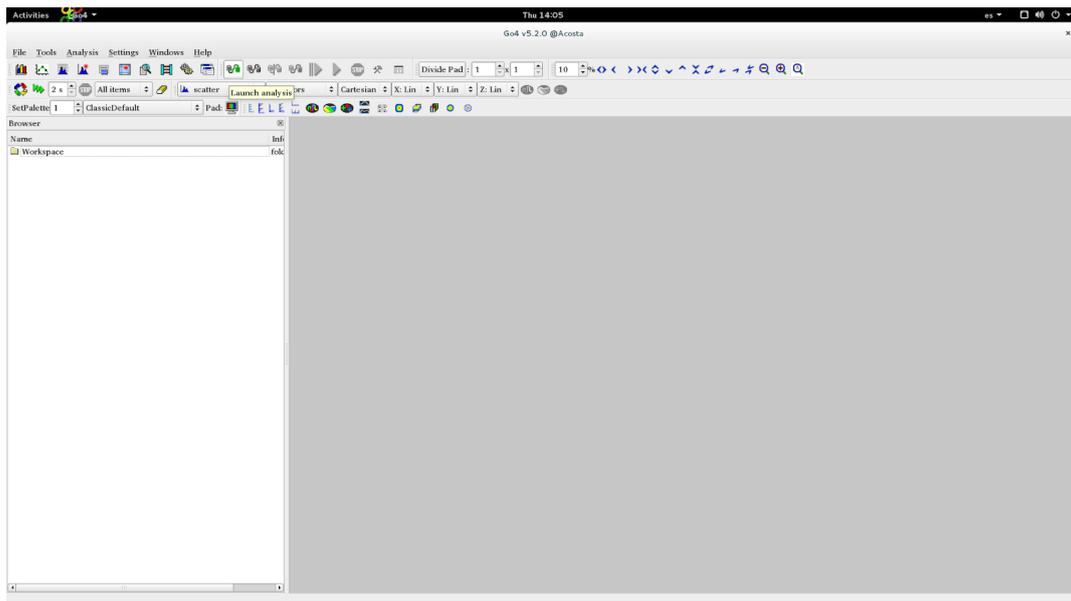


Figura 4.1: Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.

Después se abrirá una ventana (Fig 4.2) en la que solo es necesario dar click en la paloma verde siempre y cuando tenga la misma información que la siguiente captura de pantalla.

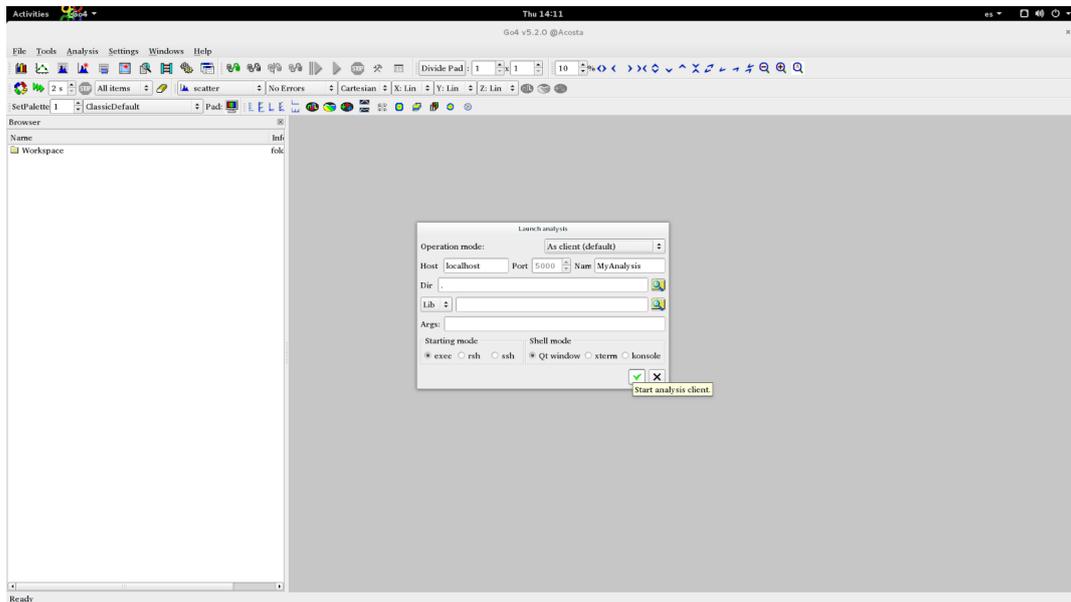


Figura 4.2: Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.

Ahora debemos seleccionar MBS Stream Server, quitar la paloma de la casilla de Enabled y escribir el nombre la computadora dónde se está haciendo la adquisición en Name, en este caso es lipc-1, como se muestra a continuación en la figura 4.3:

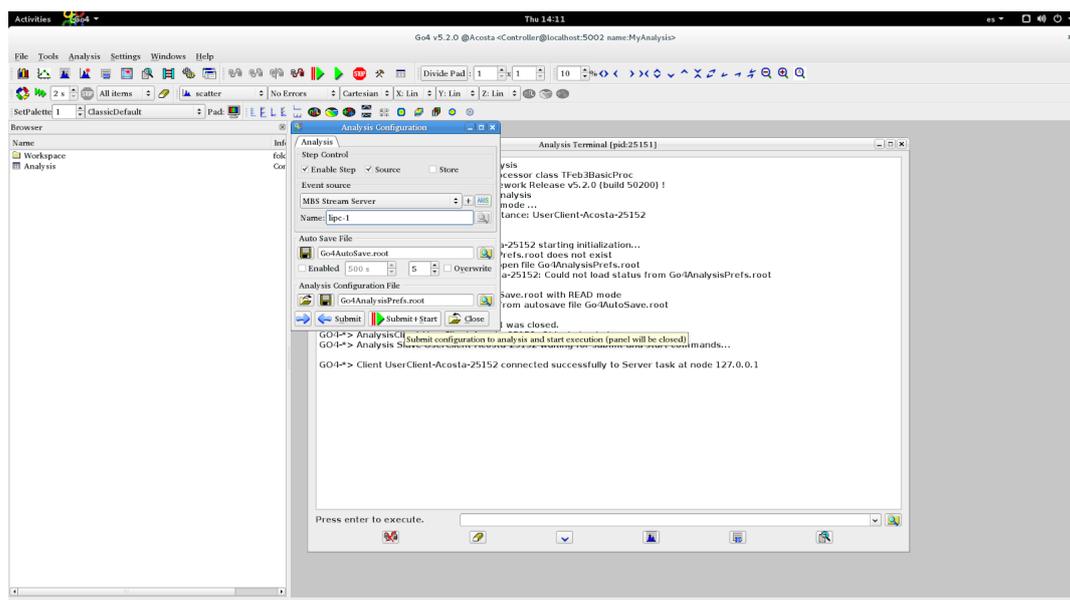


Figura 4.3: Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.

Finalmente se muestra cómo se ve el programa funcionando (Fig 4.4), a la izquierda en análisis podemos encontrar las carpetas con los histogramas. Una parte importante para saber si el programa está funcionando adecuadamente es notar si hay eventos, en caso de que el conteo se muestre en 0 como en la siguiente captura, se deben revisar los pasos que se siguieron pues debe haber algún error.

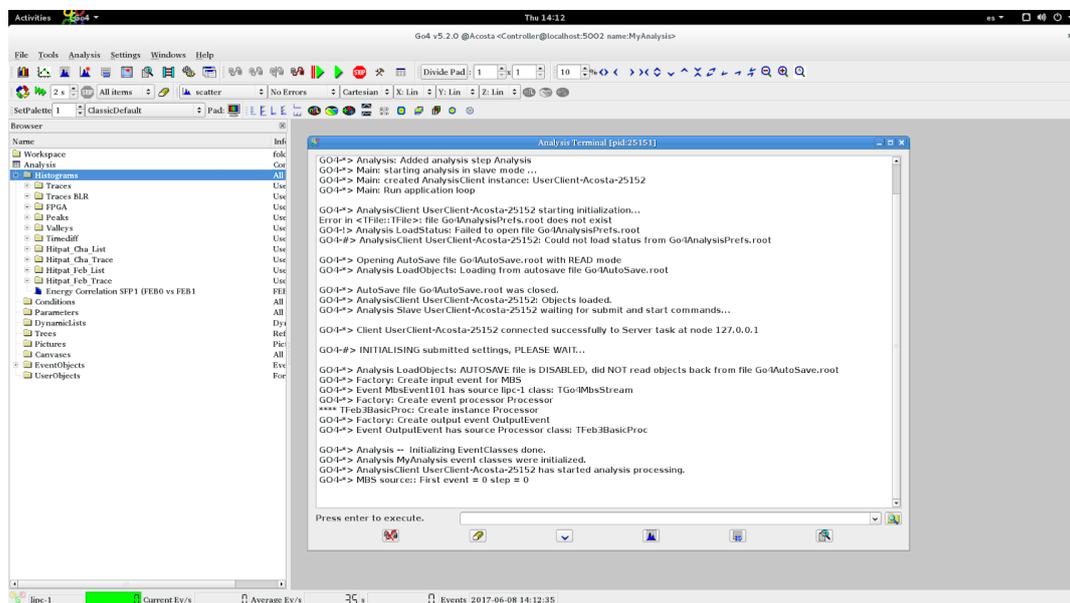


Figura 4.4: Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.

```
>rm *.root;go4 sil
```

% Este comando también es para abrir go4 pero borra información que pudiera estar almacenada en el programa, de no borrarla podríamos tener datos de experimentos anteriores en nuestra adquisición.

```

rm: cannot remove '*.root': No such file or directory
Go4 v5.2.0, build with ROOT 5.34/36 and Qt 4.8.6
Gtk-Message: Failed to load module çanberra-gtk-module
Using Qt settings at /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/.config/GSI/go4.conf (default)
cmd: sh -c "go4analysis -gui MyAnalysis 127.0.0.1 5002 "
killcmd: sh -c "killall go4analysis"
Waiting for client connection on PORT: 5002
GO4-*>TaskManager: Succesfully added new client UserClient-Acosta-21632
(host Acosta, ports 5003,5004,5005)
Waiting for client connection on PORT: 5002

```

En la segunda terminal desde la computadora dónde estamos trabajando entramos al programa con el que vamos a visualizar los resultados de la adquisición y realizamos un reinicio primero para evitar que la información que obtengamos se confunda con la de un experimento anterior.

TERMINAL 3

```

>ssh lipc-1 % Este comando nos da control sobra la computadora del crate.
Linux lipc-1 3.2.0-4-686-pae 1 SMP Debian 3.2.65-1 i686
>rate % Este comando nos mostrará la toma de datos en tiempo real para verificar que el arreglo siga
funcionando.

```

```

Event building — Server — File output MB Events Kb/sec Ev/sec — Kb/sec — Kb/sec Index . . .
% Es importante asegurarse de ver en esta pantalla eventos para saber que lo que hemos hecho hasta el
momento está funcionando.

```

Finalmente dejamos en una última terminal abierta con información que se actualiza en vivo, así nos aseguramos de que el sistema sigue trabajando y podemos también ver el espacio que llegara a ocupar algún archivo si decidimos guardar la información.

Ahora veremos cómo guardar los datos que obtenemos, de nuevo vamos a las terminales. Abrimos una nueva y volvemos a la 2:

TERMINAL 4

```

>cd rfio/ % Este comando le indica a la computadora en qué carpeta vamos a trabajar.
>./rawDispRFIO64-wheezy % Este comando le indica a la computadora que vamos a iniciar el
programa RFIO para guardar información ahí.

```

```

-I- 64 bit RFIO test server (Acosta) listening on port 1974 forks './rawServRFIO64-wheezy' for each
client request -I- client no 1 accepted log file client no. 1: ./mbsdaq.t1496949616.p25549.log

```

TERMINAL 2

```

mbs>con rfio lyserv -disk % Este comando le indica al programa en qué unidad va a guardar la
información.

```

```
-LIPC-1 :transport :Connected RFIO server!
```

```
mbs>open file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/examplefirst = 1 size = 65 -auto -rfio
```

% Este comando indica la carpeta en la que se guardará todo, se le indica el nombre que van a usar los archivos que se van a guardar de manera automática y el tamaño que deben tener. En este ejemplo la palabra example en el comando es el nombre que van a llevar, se puede cambiar por la que el usuario desee, luego se indica en first=1 que al guardar archivos empiece con el número 1 en adelante, se debe tener cuidado con esto para evitar sobrescribir archivos, finalmente se le indica que cada que un archivo pese 65 MB, se debe crear uno nuevo pues es el límite para el tamaño del archivo.

```
-LIPC-1 :transport :open file at server lyserv:: mbs>-LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0001.lmd
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0001.lmd closed
-LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 64.979 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0001.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0002.lmd
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0002.lmd closed
-LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 64.979 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0002.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0003.lmd
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0003.lmd closed
-LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 64.979 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0003.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0004.lmd
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0004.lmd closed
-LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 64.979 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0004.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0005.lmd
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/example_0005.lmd closed .
..
```

% Este proceso continúa hasta que el disco se quede sin espacio o se detenga la adquisición, podemos detener esto con el comando Ctrl+c

Al hacer esto se empezará a guardar la información, podemos ver en la terminal 3 que ahora se muestra el tamaño de los archivos que se van creando. Si no detenemos al programa este seguirá guardando información, sin embargo si queremos que solo guarde una cantidad de información se le puede pedir que guarde un número exacto de archivos agregando number= y el número, como en el siguiente ejemplo para 5:

```
mbs>open file/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre number= 5 first=1 size=40 -auto -rfio
```

```
-LIPC-1 :transport :open file at server lyserv:: -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0001.lmd
mbs>-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0001.lmd closed -LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 39.977 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0001.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0002.lmd
```

```
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0002.lmd closed -  
LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 39.977 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/Lyn-  
xOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0002.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0003.lmd  
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0003.lmd closed -  
LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 39.977 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/Lyn-  
xOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0003.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0004.lmd  
-LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0004.lmd closed -  
LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 39.977 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/Lyn-  
xOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0004.lmd -LIPC-1 :transport :/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0005.lmd  
-LIPC-1 :transport :Last auto file:rfiocopy:lyserv:/LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0005.lmd -  
LIPC-1 :transport :-I- remote output file /LynxOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0005.lmd closed -  
LIPC-1 :transport :Rfio server lyserv: closed file after 39.977 MB, open next: -LIPC-1 :transport :/Lyn-  
xOS/mbsusr/mbsdaq/mbs_data/nombre0005.lmd
```


Capítulo 5

CONCLUSIONES

De todo el estudio realizado descrito en los capítulos de esta tesis, extraemos las siguientes conclusiones.

Como resultados de todas las pruebas realizadas en esta tesis, se obtuvo una propuesta de optimización para la óptica de transporte de haz de la línea a cero grados del acelerador Van de Graaff del Acelerador de 5.5 MeV del IFUNAM, con la ayuda de programas específicos para tales fines. Además, se caracterizó una cadena electrónica completa para 32 canales de un detector DSSSD en conjunto con el nuevo sistema de adquisición FEBEX3. Con este trabajo se puede decir que el sistema está listo para funcionar en un experimento real, con uno o más detectores segmentados. Como producto auxiliar para el uso de detectores segmentados + FEBEX (la base del arreglo SIMAS), en este trabajo se elaboró un manual de usuario para lanzar el sistema de adquisición de datos, además de una descripción detallada del modo correcto de conexión y uso de los distintos dispositivos que componen, tanto el sistema de adquisición, como la cadena electrónica analógica.

Respecto a la caracterización se encontró que la resolución varía según el detector que se use. Mejora para el detector de Germanio ORTEC para gammas pues son fotones y el detector ultrapuro. La señal en el silicio es estándar. La resolución en las caras P y en N del DSSSD es distinta, la P es mejor y es muestra de una característica primaria de este detector. El detector DSSSD fue probado primero con partículas alfa de una fuente radioactiva y la resolución energética fue evaluada para el pico con más eventos entre los 32 canales. La resolución energética fue estimada para ambas caras del detector antes y después del accidente en el laboratorio que dañó el detector. Se encontró que la resolución energética para la primera toma de datos con la fuente triple alfa fue de 36.500 ± 0.030 keV para la cara P y 40.400 ± 0.041 keV para la cara N. La resolución encontrada para la segunda toma de datos, después del accidente, con la fuente triple alfa fue de 53.600 ± 0.009 keV para la cara P y 53.200 ± 0.006 keV para la cara N. La resolución encontrada para el detector de Germanio con Cobalto fue de 44.209 ± 0.002 keV para el pico de 1.17 MeV y 35.365 ± 0.026 keV para el pico de 1.33 MeV. La resolución esperada con un detector de

Germanio para ambos fotones del Cobalto suele ser de 59 keV. La resolución encontrada para el detector de Germanio con Cesio fue de 30.656 ± 0.001 keV para el pico de 0.667 MeV. La resolución esperada con un detector de Germanio para el Cesio suele ser de 27 keV. Finalmente la resolución encontrada con el DSSSD para la toma de datos con la fuente de protones que se dispersan por la placa de oro fue de 35.100 ± 0.00418 keV para la cara P y 67.300 ± 0.00496 keV para la cara N.

El mapeo de una fuente de partículas es posible con el detector pues tiene una resolución confiable dados los resultados, pero para hacer el mapeo completo es necesario continuar trabajando para poder convertir los archivos lmd que tienen la información necesaria para poder determinar las coincidencias entre los canales y así poder asignar una coordenada en dos dimensiones a cada partícula.

Con base en lo anterior podemos afirmar que el detector DSSSD y el sistema de digitalización FE-BEX3 mostraron resultados útiles para el estudio de reacciones nucleares, además de ser fáciles de utilizar si se sigue el proceso adecuado.

Apéndice

En este apéndice se encuentran las tablas con la información recolectada en cada toma de datos que se realizó.

Tabla 1. Ubicación de los picos correspondientes a ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu de cada histograma asignado a cada canal para la primera toma de datos en la cara P:

Histograma 1	Canal	Hombros	Histograma 9	Canal2	Hombros
Pico 1	-660160	-654659	Pico 1	-635696	-630919
Pico 2	-621570	-616081	Pico 2	-599412	-593822
Pico 3	-582671	-578025	Pico 3	-562315	-557742
Histograma 2			Histograma 10		
Pico 1	-636552	-631616	Pico 1	-630468	-626178
Pico 2	-600429	-596978	Pico 2	-594982	-589913
Pico 3	-563042	-557737	Pico 3	-557644	-552282
Histograma 3			Histograma 11		
Pico 1	-655867	-652193	Pico 1	-641398	-636792
Pico 2	-619532	-614432	Pico 2	-604655	-599714
Pico 3	-580592	-576382	Pico 3	-567011	-561404
Histograma 4			Histograma 12		
Pico 1	-653475	-648377	Pico 1	-668615	-663467
Pico 2	-616595	-611606	Pico 2	-630927	-625871
Pico 3	-577763	-571689	Pico 3	-591133	-584977
Histograma 5			Histograma 13		
Pico 1	-639864	-635092	Pico 1	-657797	-653286
Pico 2	-603824	-598850	Pico 2	-620510	-614596
Pico 3	-566262	-560273	Pico 3	-581018	-575806
Histograma 6			Histograma 14		
Pico 1	-639006	-634420	Pico 1	-632395	-626988
Pico 2	-602912	-597229	Pico 2	-596380	-591070
Pico 3	-565422	-559739	Pico 3	-558917	-553897
Histograma 7			Histograma 15		
Pico 1	-695447	-690505	Pico 1	-643084	-638614
Pico 2	-655694	-651082	Pico 2	-607006	-601046
Pico 3	-614624	-610012	Pico 3	-568906	-563585
Histograma 8			Histograma 16		
Pico 1	-647254	-642988	Pico 1	-644648	-639840
Pico 2	-610483	-604897	Pico 2	-607984	-603476
Pico 3	-572900	-567110	Pico 3	-569918	-565310

Tabla 2. Anchura a media altura con su respectivo error para cada uno de los 16 canales para la primera toma de datos en la cara P:

Histogramas	FWHM	Error FWHM (keV)
Histograma 1	-3.82E-02	-3.29E-02
Histograma 2	-3.74E-02	-4.17E-02
Histograma 3	-3.80E-02	-3.47E-02
Histograma 4	-3.84E-02	-3.90E-02
Histograma 5	-3.90E-02	-3.16E-02
Histograma 6	-4.04E-02	-4.16E-02
Histograma 7	-3.95E-02	-3.99E-02
Histograma 8	-4.02E-02	-3.10E-02
Histograma 9	-4.11E-02	-3.25E-02
Histograma 10	-3.99E-02	-3.45E-02
Histograma 11	-3.90E-02	-3.78E-02
Histograma 12	-3.95E-02	-3.51E-02
Histograma 13	-3.87E-02	-3.21E-02
Histograma 14	-3.86E-02	-3.87E-02
Histograma 15	-3.86E-02	-3.10E-02
Histograma 16	-3.86E-02	-3.85E-02

Tabla 3. Ubicación de los picos correspondientes a ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu de cada histograma asignado a cada canal para la segunda toma de datos en la cara P:

Histograma 1	Canal	Histograma 9	Canal3
Pico 1	-660105	Pico 1	-637164
Pico 2	-622494	Pico 2	-600536
Pico 3	-583685	Pico 3	-563027
Histograma 2		Histograma 10	
Pico 1	-637506	Pico 1	-630487
Pico 2	-601098	Pico 2	-594920
Pico 3	-563596	Pico 3	-558383
Histograma 3		Histograma 11	
Pico 1	-657097	Pico 1	-641454
Pico 2	-619491	Pico 2	-605183
Pico 3	-581274	Pico 3	-567170
Histograma 4		Histograma 12	
Pico 1	-653168	Pico 1	-667012
Pico 2	-616282	Pico 2	-630131
Pico 3	-578401	Pico 3	-591212
Histograma 5		Histograma 13	
Pico 1	-640451	Pico 1	-657483
Pico 2	-604137	Pico 2	-620653
Pico 3	-566542	Pico 3	-581453
Histograma 6		Histograma 14	
Pico 1	-640126	Pico 1	-632646
Pico 2	-603892	Pico 2	-596944
Pico 3	-566042	Pico 3	-559561
Histograma 7		Histograma 15	
Pico 1	-688767	Pico 1	-643765
Pico 2	-655664	Pico 2	-606720
Pico 3	-614785	Pico 3	-568989
Histograma 8		Histograma 16	
Pico 1	-648055	Pico 1	-646137
Pico 2	-611023	Pico 2	-609694
Pico 3	-572962	Pico 3	-570551

Tabla 4. Anchura a media altura con su respectivo error para cada uno de los 16 canales para la segunda toma de datos en la cara P:

Histogramas	FWHM	Error FWHM (keV)
Histograma 1	-4.21E-02	-3.95E-03
Histograma 2	-4.51E-02	-4.42E-03
Histograma 3	-5.84E-02	-6.96E-03
Histograma 4	-1.04E-01	-1.38E-02
Histograma 5	-4.47E-02	-4.70E-03
Histograma 6	-5.36E-02	-9.47E-03
Histograma 7	-4.35E-02	-4.30E-03
Histograma 8	-4.93E-02	-6.93E-03
Histograma 9	-7.37E-02	-1.01E-02
Histograma 10	-2.93E-01	-1.91E-01
Histograma 11	-6.76E-02	-1.50E-02
Histograma 12	-1.56E-01	-5.05E-02
Histograma 13	-1.39E-01	-3.41E-02
Histograma 14	-9.19E-02	-1.38E-02
Histograma 15	-1.25E-01	-2.82E-02
Histograma 16	-5.54E-02	-3.36E-01

Tabla 5. Ubicación de los picos correspondientes a ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu de cada histograma asignado a cada canal para la segunda toma de datos en la cara N:

Histograma 1	Canal	Histograma 9	Canal3
Pico 1	597555	Pico 1	569579
Pico 2	637353	Pico 2	608259
Pico 3	675990	Pico 3	643546
Histograma 2		Histograma 10	
Pico 1	575854	Pico 1	563820
Pico 2	614192	Pico 2	602074
Pico 3	651540	Pico 3	637408
Histograma 3		Histograma 11	
Pico 1	573631	Pico 1	576358
Pico 2	612558	Pico 2	615151
Pico 3	648870	Pico 3	652153
Histograma 4		Histograma 12	
Pico 1	578010	Pico 1	556449
Pico 2	615877	Pico 2	591727
Pico 3	654097	Pico 3	628838
Histograma 5		Histograma 13	
Pico 1	599688	Pico 1	618104
Pico 2	639620	Pico 2	658861
Pico 3	678232	Pico 3	698249
Histograma 6		Histograma 14	
Pico 1	572712	Pico 1	-
Pico 2	611353	Pico 2	-
Pico 3	647688	Pico 3	-
Histograma 7		Histograma 15	
Pico 1	598543	Pico 1	-
Pico 2	638952	Pico 2	-
Pico 3	676667	Pico 3	-
Histograma 8		Histograma 16	
Pico 1	577580	Pico 1	569152
Pico 2	616386	Pico 2	607811
Pico 3	653344	Pico 3	643790

Tabla 6. Anchura a media altura con su respectivo error para cada uno de los 16 canales para la segunda toma de datos en la cara P:

Histogramas	FWHM	Error FWHM (keV)
Histograma 1	5.70E-02	9.50E-03
Histograma 2	4.68E-02	8.09E-03
Histograma 3	6.21E-02	8.03E-03
Histograma 4	7.66E-02	1.49E-02
Histograma 5	5.16E-02	4.39E-03
Histograma 6	5.32E-02	6.45E-03
Histograma 7	5.84E-02	8.23E-03
Histograma 8	5.41E-02	6.45E-03
Histograma 9	1.43E-01	2.74E-02
Histograma 10	5.78E-02	6.61E-03
Histograma 11	1.09E-01	1.43E-02
Histograma 12	3.81E-01	4.03E-01
Histograma 13	7.00E-02	1.00E-02
Histograma 14	-	-
Histograma 15	-	-
Histograma 16	1.74E-01	4.09E-02

Tabla 7. Ubicación de los picos asociados a los protones que se ven dispersados por la delgada capa de oro de cada histograma asignado a cada canal para la toma de datos con protones deflectados en oro en la cara P:

Histograma 1	Canal	Histograma 9
Pico 1	-	Pico 1
Histograma 2		Histograma 10
Pico 1	-173215	Pico 1
Histograma 3		Histograma 11
Pico 1	-178583	Pico 1
Histograma 4		Histograma 12
Pico 1	-	Pico 1
Histograma 5		Histograma 13
Pico 1	-172215	Pico 1
Histograma 6		Histograma 14
Pico 1	-165622	Pico 1
Histograma 7		Histograma 15
Pico 1	-185468	Pico 1
Histograma 8		Histograma 16
Pico 1	-167542	Pico 1

Tabla 8. Anchura a media altura con su respectivo error para cada uno de los 16 canales para la toma de datos con protones deflectados en oro en la cara P:

Histogramas	FWHM	Error FWHM (keV)
Histograma 1	-	-
Histograma 2	5.35E-02	7.38E-02
Histograma 3	2.65E-02	6.99E+00
Histograma 4	-	-
Histograma 5	3.07E-02	3.25E-02
Histograma 6	3.77E-02	4.64E-02
Histograma 7	8.17E-02	1.60E-01
Histograma 8	3.50E-02	7.80E-02

Tabla 9. Ubicación de los picos asociados a los protones que se ven dispersados por la delgada capa de oro de cada histograma asignado a cada canal para la toma de datos con protones deflectados en oro en la cara N:

Histograma 1	Canal	Histograma 9
Pico 1	183196	Pico 1
Histograma 2		Histograma 10
Pico 1	176012	Pico 1
Histograma 3		Histograma 11
Pico 1	175213	Pico 1
Histograma 4		Histograma 12
Pico 1	176913	Pico 1
Histograma 5		Histograma 13

Tabla 10. Anchura a media altura con su respectivo error para cada uno de los 16 canales para la toma de datos con protones deflectados en oro en la cara P:

Histogramas	FWHM	Err FWHM (keV)
Histograma 1	0.0000599	0.044813485
Histograma 2	0.0588718	0.040632666
Histograma 3	0.0605534	0.042333297
Histograma 4	0.0594058	0.04165851
Histograma 5	0.0595895	0.042313484
Histograma 6	0.064761	0.04591871
Histograma 7	14.876	979301
Histograma 8	0.0708947	0.0528429

Índice de figuras

1.1. Área de la elipse de un haz de partículas en el espacio fase en función al parámetro Twiss β [21].	5
1.2. Diagrama unidimensional del acelerador del Instituto de Física [6].	6
1.3. Dipolo y duplete de cuadrupolos del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM [6].	7
1.4. Seleccionador y separación de las líneas del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM [6].	7
1.5. Electrones compartidos en un enlace covalente en un arreglo de átomos de Silicio [16].	8
1.6. Electrones en un arreglo de átomos de Silicio dopados con un átomo de antimonio y uno de boro [16].	9
1.7. Clasificación de desintegración en un átomo [23].	12
1.8. Fotografía del detector de silicio DSSSD.	16
1.9. Estructura de las tiras del detector DSSSD en la superficie.	17
1.10. Fotografía de las tarjetas: Modulo FEBEX3 que se encuentra en el Laboratorio LEMA del Instituto de Física, UNAM.	20
1.11. Vista superior del módulo EXPLODER que se encuentra en el Laboratorio LEMA del Instituto de Física, UNAM.	21
1.12. Módulo de la Computadora Principal PEXOR3 [26].	22
1.13. Módulo de la Computadora Principal PEXOR3 [26].	22
1.14. Diagrama de la estructura de Go4, con el Análisis e Interfaz Gráfica del Usuario [27].	23
1.15. Diagrama de los pasos para el análisis en Go4 [27].	24
1.16. Diagrama de la definición y control de los pasos en el Análisis de Go4 [27].	25
2.1. Simulación del mejor caso enfocando a un punto sólo con el primer doblete: primer cuadrupolo negativo con valores $k_1 = -3.02285$ y $k_1 = 3.87462$. Enfocando a $30 \beta_x$ y β_y	28
2.2. Simulación del caso enfocando el haz a un punto pequeño con el primer cuadrupolo negativo con valores $k_1 = -3.40177$ y $k_1 = 4.37682$. Enfocando a $10 \beta_x$ y β_y	29

2.3. Simulación del caso donde se quiere un haz paralelo: primer cuadrupolo positivo. $k_1 = 6.23520$ y $k_1 = -4.80652$. Enfocando a $30 \beta_x$ y β_y	29
2.4. Simulación del haz enfocándose a un punto pequeño: primer cuadrupolo positivo. $k_1 = 6.10788$ y $k_1 = -4.50599$. Enfocando a $20 \beta_x$ y β_y	30
2.5. Simulación del mejor caso para obtener un haz divergente: primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos. $k_1 = 5.7431$ y $k_1 = -4.39398$ para el primero. $k_1 = 3.45464$ y $k_1 = -5.3449$ para el segundo. Enfocando a $30 \beta_x$ y β_y	30
2.6. Simulación del mejor caso para obtener un haz paralelo: primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.03676$ y $k_1 = -4.91242$, para el primero y $k_1 = 3.51322$ y $k_1 = -4.91569$, para el segundo. Enfocando a $20 \beta_x$ y β_y	31
2.7. Simulación del mejor caso para obtener un haz enfocándose: primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$, para el primero y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$, para el segundo. Enfocando a menos de $10 \beta_x$ y β_y	31
2.8. Simulación con líneas más suaves del mejor caso primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$, para el primero y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$, para el segundo. Enfocando a menos de $10 \beta_x$ y β_y y con el primer par de cuadrupolos a 1.10 metros.	32
2.9. Simulación del mejor caso primer y segundo cuadrupolo positivos con dos dipolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$, para el primero y $k_1 = 3.71012$ y $k_1 = -5.4937$, para el segundo. Enfocando a menos de $10 \beta_x$ y β_y y con el primer par de cuadrupolos a 1.30 m.	32
2.10. Simulación del tamaño del haz media cuadrática a través del acelerador terminando después del primer par de cuadrupolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$	33
2.11. Simulación de las β_x y β_y a través del acelerador terminando después del primer par de cuadrupolos con valores $k_1 = 6.17211$ y $k_1 = -5.04999$	34
2.12. Simulación de la distribución de partículas en el haz al inicio del acelerador.	35
2.13. Simulación de la distribución de partículas en el haz a 20 centímetros después del primer Dipolo.	35
2.14. Simulación de la distribución de partículas en el haz a la entrada del segundo dipolo.	36
2.15. Simulación de la evolución del tamaño del haz de partículas a lo largo de toda la línea en TRAVEL.	37
2.16. Fotografía del preamplificador conectado al detector por fuera de la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.	39
2.17. Fotografía de fuente de voltaje del preamplificador.	39
2.18. Fotografía de la bomba mecánica de vacío de la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.	40
2.19. Fotografía de las tarjetas: Módulo FEBEX3 sobre un ventilador.	40

2.20. Fotografía de la fuente TDK-LAMBDA de alimentación de las tarjetas.	41
2.21. Fotografía de las fuentes de alimentación para un fototubo (izquierda), fuente del detector y generador de pulsos (centro) y fuente del preamplificador (derecha).	41
2.22. Fotografía del módulo EXPLODER conectado a la computadora principal y al módulo FEBEX.	42
2.23. Fotografía de la fuente Tektronix PWS4602 de alimentación del módulo EXPLODER.	42
2.24. Fotografía de la computadora principal vista desde atrás con sus respectivas conexiones de VGA al monitor, un cable ethernet a la segunda computadora, el módulo EXPLODER y el cable de alimentación.	43
2.25. Fotografía del medidor de vacío conectado a la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.	43
2.26. Fotografía de la vista al detector montado dentro de la cámara de bombardeo de la línea del acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, UNAM.	44
2.27. Captura de pantalla del software de monitorización Go4.	45
2.28. Ejemplo de un histograma visto en ROOT.	45
2.29. Diagrama del arreglo experimental para la detección de protones dispersados por una placa de oro.	47
3.1. Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara P.	50
3.2. Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara N.	50
3.3. Correlación de energía entre la cara P y N para un sólo canal.	51
3.4. Proyección en X de la correlación de energía.	51
3.5. Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara P.	52
3.6. Histograma de Cuentas vs Canales para ^{244}Cm , ^{241}Am y ^{239}Pu en la cara N.	52
3.7. Correlación de energía entre la cara P y N para un sólo canal.	53
3.8. Proyección en X de la correlación de energía.	53
3.9. Histograma de Cuentas vs Canales para ^{137}Cs	54
3.10. Histograma de Cuentas vs Canales para ^{60}Co	55
3.11. Histograma de Cuentas vs Canales para protones dispersados por oro en la cara P.	55
3.12. Histograma de Cuentas vs Canales para protones dispersados por oro en la cara N.	56
3.13. Correlación de energía entre la cara P y N para un sólo canal.	56
3.14. Proyección en X de la correlación de energía.	57
3.15. Histograma de la distribución de eventos por canal en la cara P.	58
3.16. Gráfica de los picos integrados para la cara N del detector.	59
4.1. Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.	65
4.2. Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.	65
4.3. Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario.	66

4.4. Captura de pantalla de Go4 para el manual de usuario. 66

Referencias

- [1] Edmund Wilson, Edward J. N. Wilson, An Introduction to Particle Accelerators, First Edition, 2001.
- [2] Helmut Wiedemann, Particle Accelerator Physics, Third Edition, 2007.
- [3] Marcus McEllistrem. UK Low-Energy Nuclear Physics Homepage. University of Kentucky: Accelerator Facilities. Liga: <http://www.pa.uky.edu/~marcus/accel2.html> Consulta: 26/01/17
- [4] MAD - Methodical Accelerator Design. European Council for Nuclear Research: MAD-X Home Page. Liga: http://mad.web.cern.ch/mad/madx.old/madx_manual.pdf Consulta: 26/01/17
- [5] CERN Document Server. Travel Software using GPU Hardware. Liga: <https://cds.cern.ch/record/2063005?ln=es> Consulta: 26/01/17
- [6] Instituto de Física UNAM. Laboratorio Acelerador Van de Graff 5.5 MV. Liga: <http://laboratorios.fisica.unam.mx/home?id=13> Consulta: 26/01/17
- [7] Grupo de Física Nuclear. Radioactividad y desintegraciones nucleares. Liga: <http://nuclear.fis.ucm.es/EM2011/desintegraciones-em2011.pdf> Consulta: 26/01/17
- [8] Health Physics Society. Plutonium. Liga: <http://hpschapters.org/northcarolina/NSDS/plutonium.pdf> Consulta: 26/01/17
- [9] Health Physics Society. Curium. Liga: <http://hpschapters.org/northcarolina/NSDS/curium.pdf> Consulta: 26/01/17
- [10] Health Physics Society. Americium. Liga: <http://hpschapters.org/northcarolina/NSDS/americium.pdf> Consulta: 26/01/17

- [11] Örbom, A., Ahlstedt, J., Serén, T., Auterinen, I., Kotiluoto, P., Hauge, H., Strand, S-E. (2015). Characterization of a double-sided silicon strip detector autoradiography system. *Medical Physics*, 42(2), 575-584. DOI: 10.1118/1.4905049
- [12] Slide Player. Silicon Detectors XII School on Instrumentation Bogotá , Nov. 25th - Dec 6th, 2013 Part 2. Liga: <http://slideplayer.com/slide/10533678/> Consulta: 26/01/17
- [13] Dragon. The TRIUMF Detector of Recoils And Gammas Of Nuclear Reactions. Liga: <http://dragon.triumf.ca/dsssd.html> Consulta: 26/01/17
- [14] Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. Tecnología Informática y Computación. Liga: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19119/1/Sistemas%20de%20adquisición%20y%20Procesamiento%20de%20datos.pdf> Consulta: 26/01/17
- [15] Raúl Oscar Barrachina. Dispersión de Rutherford. Liga: <https://www.raulbarrachina.com.ar/wp-content/uploads/2020/01/mecanica012.pdf> Consulta : 26/01/17
- [16] Blogodisea. Aislantes, conductores y semiconductores. Liga: <http://www.blogodisea.com/aislantes-conductores-semiconductores.html> Consulta: 26/01/17
- [17] Illinois Accelerator Institute. Minimization of Theoretical Minimum Emittance in Storage Rings. Liga: <http://cds.cern.ch/record/1017689/files/ab-note-2007-014.pdf?version=1> Consulta: 26/01/17
- [18] CERN Document Server. Accelerators for pedestrians. Liga: https://www.illinoisacceleratorinstitute.org/2011%20Program/student_papers/Wen_Wei_Ho.pdf Consulta: 26/01/17
- [19] U.S. Particle Accelerator School. Transverse Beam Optics, Part I. Liga: <http://uspas.fnal.gov/materials/09VU/Lecture6.pdf> Consulta: 26/01/17
- [20] U.S. Particle Accelerator School. Transverse Beam Optics, Part II. Liga: <http://uspas.fnal.gov/materials/09VU/Lecture7.pdf> Consulta: 26/01/17

- [21] Taking a closer look at LHC. Complex movement. Liga: https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.complex_movement
- [22] Researchgate. Modelos para Transporte de haz en Aceleradores de Partículas. Liga: https://www.researchgate.net/profile/Roberto_Strangis/publication/260309530_Modelos_para_Transporte_de_haz_en_Aceleradores_de_Partículas/links/5441110c0cf27c1028000000/Modelos-para-Transporte-de-haz-en-Aceleradores-de-Particulas.pdf
- [23] Grupo de Física Nuclear. Desintegraciones radioactivas. Liga: http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/archivos/RADIOACTIVIDAD_CLASE.PPT.pdf
Consulta: 26/01/17
- [24] Departamento de programas audiovisuales. I. Q. Luis Farrera G. CONDUCTORES SEMICONDUCTORES Y AISLANTES. Liga: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/condsemicondais2_27505.pdf
Consulta: 26/01/17
- [25] INSTITUTT FOR FYSIKK OG TEKNOLOGI. From MSc Thesis of Lars Gimmestad Johansen. Liga: <http://web.ift.uib.no/AMOS/PHYS208/larsP-N/p-n-slide-lars.pdf>
- [26] N. Kurz, Indico CERN Homepage. European Organization for Nuclear Research: MBS (Multi Branch System). Liga: <https://indico.cern.ch/event/617177/attachments/1424870/2185375/mbs-febex.pdf>
- [27] J.Adamczewski-Musch, M.Al-Turany, S.Augustin, D.Bertini, H.G.Essel, S.Linev. The Go4 Analysis Framework
- [28] Introduction V5.2. Liga: <https://cds.cern.ch/record/865622/files/p449.pdf>
- [29] Wei-Kan Chu, Backscattering Spectrometry, United Kingdom Edition, 1978.
- [30] Garutti Erika, DESY Homepage. Deutsches Elektronen Synchrotron: The Physics of Particle Detectors. Liga: http://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1_Introduction_HEPdetectors.pdf
- [31] Gonzáles Sprinberg Gabriel, Rabin Lema Carolina, Facultad de Ciencias, Universidad de la República: Para entender las radiaciones. Liga: http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Como_se_mide_la_radiacion.pdf

- [32] Mack, D. A., CAMAC Concepts, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 84, No. 497, p.167, 1972PASP...84..167M
- [33] VMEbus Specification Manual, Revision C.1, October 1 985, Third Printing
- [34] FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH: FAIR Home Page. Liga: <https://fair-center.eu/> Consulta: 26/01/17
- [35] Dee PI, Wormell TW. 1963. An index to C.T.R.Wilson's Laboratory records and notebooks in the library of the Royal Society.
- [36] Molecular Quantum Mechanics Parts I and II: An Introduction to Quantum Chemistry (Volume 1), P.W. Atkins, Oxford University Press, 1977.
- [37] Detección Electrónica de radiaciones nucleares, J. Campos, Madrid, 1972. Liga: <https://www.ipen.br/biblioteca/rel/R33049.pdf>
- [38] Sistemas de adquisición de datos, De los Fundamentos al Diseño Aplicado, Di Paolo Emilio , Maurizio, 2013.
- [39] EE Digital Electronics: EXPLODER3, preliminary specification, J. Hoffmann, 2012. Liga: https://www.gsi.de/fileadmin/EE/Module/EXPLODER/exploder3_v4.pdf
- [40] EE Digital Electronics: PEXOR3, preliminary specification, J. Hoffmann, N. Kurz, S. Minami, W. Ott, 2012. Liga: https://www.gsi.de/fileadmin/EE/Module/PEXOR/pexor3_v1.pdf
- [41] EE Digital Electronics: TRIXOR1, PC-based Trigger Module, J. Hoffmann, 2010. Liga: https://www.gsi.de/fileadmin/EE/Module/PEXOR/pexor3_v1.pdf
- [42] MPR-16/L MPR-32 / MPR-6, Mesytec Readout Systems, 2018. Liga: <https://www.mesytec.com/products/nuclear-physics/MPR-16-log.html>
- [43] PWS4602 Linear DC Power Supplies Specifications and Performance Verification, Technical Reference. Liga: http://www.testequipmentdepot.com/tektronix/pdf/pws4000_ref.pdf
- [44] senTorr Gauge Controller Instruction Manual, 1999 Liga: <https://www.idealvac.com/files/ManualsII/VariantsentorrBA.pdf>

[45] Genesys Programmable DC Power Supplies Liga: <https://us.tdk-lambda.com/hp/pdfs/data%20sheets/93507100.pdf>

[46] New pixel detectors in SOI technology for particle physics applications

Liga: https://www.researchgate.net/figure/Schematics-showing-a-double-sided-silicon-strip-detector-After-42_fig6_296683651