

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO
Y RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES A PARTIR
DE SEÑALES DIGITALES DE DISPOSITIVOS
DE CARGA ACOPLADA POR MEDIO DE
DOBLE MUESTREO CORRELACIONADO.



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE ASUNCIÓN
**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

TESIS DE MAESTRÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ingeniería
Laboratorio de Mecánica y Energía
Maestría en Ingeniería Electrónica

**DESARROLLO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO Y
RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES A PARTIR DE SEÑALES
DIGITALES DE DISPOSITIVOS DE CARGA ACOPLADA POR MEDIO
DE DOBLE MUESTREO CORRELACIONADO.**

Autor

Claudio Rodrigo Chavez Blanco

Tutores

Jorge Andres Molina Insfran
Raúl Igmar Gregor Recalde
Derlis Gregor Recalde

Cotutor Internacional

Gustavo Cancelo

2017

TRIBUNAL EXAMINADOR

PRESIDENTE

JORGE MOLINA, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

SECRETARIO

DERLIS GREGOR, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

VOCALES

JORGE MOLINA, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

SERGIO TOLEDO, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

RAÚL GREGOR, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

FEDERICO IZRAELEVITCH, Universidad San Martín - Comisión Nacional de
Energía Atómica, Argentina

Diciembre 2017. Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay

RESUMEN

Desde su creación, los dispositivos de acoplamiento de carga o *Charge Coupled Devices* (CCD) se han usado en la detección de imágenes tanto para aplicaciones comerciales, como también para observaciones astronómicas. Desde los años 80, todos -o casi todos- los telescopios alrededor del mundo utilizan estos detectores en su plano focal a fin de obtener las imágenes de forma digital debido a sus ventajas en términos de eficiencia cuántica, formato, y sobre todo bajo nivel de ruido electrónico.

Actualmente, con el desarrollo de la tecnología CMOS, los CCDs están perdiendo su atractivo para aplicaciones comerciales, aunque todavía son sensores de vanguardia para imágenes astronómicas debido a su tamaño, eficiencia y bajo nivel de ruido. A pesar de esto, todavía existen avances significativos en el desarrollo de la tecnología de CCD, lo que permite que cada año los científicos e ingenieros encuentren aplicaciones, como por ejemplo, en la instrumentación necesaria para las nuevas generaciones de grandes telescopios. En ese contexto, y usando como ejemplo, para el estudio de las imágenes detectadas por el telescopio del experimento *Dark Energy Survey* (DES) en el cerro Tololo en Chile, se desarrollaron detectores más gruesos, permitiendo que sean más voluminosos y con mayor masa.

El hecho de que estos sensores sean masivos y con ruido extremadamente bajo los convierte en candidatos ideales para ser usados como detectores de partículas de baja energía, sobre todo en procesos donde se necesite que el umbral de detección sea el menor posible. Al presentar estas cualidades excepcionales para un detector, un grupo del Silicon Detector Facility del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), juntamente con otros científicos, decidieron utilizar estos detectores en la búsqueda de Materia Oscura (MO) de baja masa, creando así el experimento DAMIC (Dark Matter in CCDs). Actualmente el experimento está tomando datos en el laboratorio de SNOLAB localizado a 2000 m de profundidad en la mina Craigton en Sudbury, Canadá.

Si se puede medir la energía de los núcleos de los átomos que componen el CCD que retrocedieron después del choque con la hipotética materia oscura (en un proceso conocido como *retroceso nuclear*), entonces se puede saber la masa de los objetos que participaron en la colisión, lo que permitiría conocer la masa de la MO. Recientes resultados experimentales y desarrollos teóricos sugieren la existencia de una partícula de MO con masa por debajo de 10 GeV, tal partícula escaparía a la mayoría de las búsquedas directas debido a que la electrónica utilizada por los grandes experimentos poseen umbrales para la detección de retrocesos nucleares elevados, impidiendo obtener información en las regiones de baja masa como lo hace DAMIC.

Pero no sólo se pueden usar estos detectores para medir la materia oscura, sino también cualquier colisión entre partículas donde la transferencia de energía al núcleo sea pequeña, como es el caso de la colisión coherente entre el neutrino y el núcleo de Silicio del CCD. Este proceso nunca ha sido observado hasta el momento en eventos de neutrinos de bajas energías, debido a que las señales obtenidas de esta manera no puede distinguirse del ruido electrónico.

Aprovechando que los CCDs pueden medir este tipo de señales muy pequeñas, el mismo grupo propulsor del experimento DAMIC, creó el experimento CONNIE (Coherent Neutrino Nucleon Interaction Experiment) donde se busca medir la colisión coherente de neutrinos generados en un reactor nuclear, con los núcleos de silicio que componen el CCD. Este experimento se está llevando a cabo en las inmediaciones del reactor Angra II que opera en la Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto en el estado de Rio de Janeiro, Brasil.

Si bien estos sensores son relativamente masivos, se necesita una buena cantidad de detectores para aumentar la probabilidad de interacción entre los núcleos de Silicio del CCD, tanto con los neutrinos, como con la Materia Oscura.

Para elevar la probabilidad de interacción se necesita colocar cada vez más detectores dentro de los sistemas experimentales, lo que ocasiona que la electrónica de lectura de

datos de los CCDs se complique cada vez más, ya que habrá que sincronizar y manipular varios sensores en forma simultánea.

En este trabajo de maestría se buscará generar una herramienta de software que sirva para el estudio, análisis y optimización del hardware del sistema de adquisición de datos a ser utilizado en las futuras modernizaciones (o *upgrades*) de ambos experimentos. Para esto, se va a utilizar la salida de la señal bruta del circuito de lectura de un CCD, que será digitalizada con alta tasa de muestreo, y almacenada en disco, para hacer estudios sobre los ruido correlacionados, optimización de filtros y métodos de cálculo de píxeles en la señal.

Ante estos requerimientos, se creó un software en código C++/ROOT con el que se pudo procesar y reconstruir las imágenes generadas en un CCD, y donde se le incorporo varias opciones de filtrado a fin de demostrar la utilidad y el fácil uso de esta herramienta. Se comparó la performance de los algoritmos para distintas variaciones de la señal de forma a garantizar su funcionamiento dentro del rango de condiciones esperadas.

Esta herramienta ayudará al proceso de mejora de las tarjetas de adquisición, como el proceso de filtrado en tiempo real, métodos de cálculo de pixel, etc., ya que -en base a los resultados obtenidos con esta herramienta- se podrán introducir estas mejoras en el *firmware* de los FPGAs que controlan dichas placas.

CLAUDIO CHAVEZ

Diciembre, 2017. San Lorenzo, Paraguay.

SUMMARY

Since invented, the Charge Coupled Devices (CCD) have been used in the detection of images not only for commercial applications, but for astronomical observations as well. Since the 80s, almost all telescopes around the world use these detectors in their focal plane in order to obtain images digitally due to their advantages in terms of quantum efficiency, format, and especially the low level of electronic noise.

Currently, with the development of CMOS technology, CCDs are becoming less popular for commercial applications, although they are still state-of-the-art sensors for astronomical images due to their size, efficiency and low noise level. Despite this, there are still significant advances in the development of the CCD technology, which allow scientists and engineers find applications in the instrumentation needed for new generations of large telescopes. In this context, and using as an example, to detect the images with the telescope of the experiment textit Dark Energy Survey (DES) in Cerro Tololo (Chile), thicker detectors had to be developed, allowing them to be more voluminous and with greater mass. The fact that these sensors are relative massive and with extremely low noise, makes them ideal candidates to be used as detectors for very low energy particles, especially in processes where the detection threshold is needed as little as possible. With these exceptional attributes as detector, a group of the Silicon Detector Facility of the

Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), together with other scientists, decided to use these detectors in the search of low mass Dark Matter (DM), thus creating the experiment DAMIC (Dark Matter in CCDs). The experiment is currently taking data in the SNOLAB lab located at 2000 m depth at the Craighton mine in Sudbury, Canada.

If you can measure the energy of the Silicon nuclei that recoils after the collision with the hypothetical dark matter (in a process known as *nuclear recoil*), then you can know the mass of the objects that participated in the collision. Recent experimental results and theoretical developments suggest the existence of an DM particle with a mass below 10 GeV, such a particle would escape most direct searches because the electronics used by large experiments have high thresholds for the detection of nuclear recoils, preventing obtaining information in low mass regions as DAMIC does.

These detectors not only can be used to measure dark matter, but also any collision between particles where the transfer of energy to the nucleus is small, as the coherent scattering between the neutrino and the silicon nucleus of the CCD. This process has never been observed so far in the low-energy neutrino regime, because the signals obtained in this way cannot be distinguished from the electronic noise. Taking advantage of the fact that the CCDs can measure this type of very small signals, the same group of the DAMIC experiment, created the CONNIE experiment (Coherent Neutrino Nucleon Interaction Experiment) which seeks to measure the coherent collision of neutrinos generated in a nuclear reactor, with the nuclei of silicon that make up the CCD. This experiment is being carried out in the vicinity of the Angra II reactor that operates at the Almirante Álvaro Alberto Nuclear Power Plant in the state of Rio de Janeiro, Brazil.

Although these detectors are relatively massive, a good number of detectors are needed to increase the probability of interaction among the silicon nuclei of the CCD and the neutrinos, or with the Dark Matter. Therefore it is necessary to place more and more detectors within the experimental systems, which involve an increase in the complexity of the electric readout system, since it will be in charge of reading out many sensors simultaneously.

In this master's degree thesis, a software tool was generated to be used in the study, analysis and optimization of the hardware in charge of the data acquisition system to be install in the next update of both experiments. For this, the raw *signal* output of the CCD reading circuit will be used, which will be digitized with a high sampling rate and stored in disk in order to make various studies on correlated noise, filter optimization and methods of calculation of pixels in the signal.

For these requirements, a software was created in C++/ROOT code with which it was possible to process and reconstruct the images generated in one CCD, and where several filtering options were incorporated to demonstrate the usefulness and easy use of this tool.

The performance of the algorithms was compared for different variations of the *signal* in order to guarantee its operation within the range of expected conditions.

This tool will help the process of improvement of acquisition hardware, such as the real-time filtering process, pixel calculation methods, etc., since - based on the results obtained with this tool - these improvements can be introduced into the firmware of the FPGAs that control these boards.

CLAUDIO CHAVEZ

December, 2017. San Lorenzo, Paraguay.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores, familiares, amigos y compañeros que me acompañaron en todo momento para terminar este trabajo.

Claudio Chavez

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción y en particular al Laboratorio de Mecánica y Energía por el apoyo mediante los equipos y espacio de trabajo brindado durante el desarrollo de la maestría.

Al Femi National Accelerator Laboratory por darme la oportunidad de hacer una estancia de investigación en uno de sus laboratorios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que a través del programa de Vinculación de Científicos y Tecnólogos convocatoria 2016 (PVCT16-113) dio el soporte económico para realizar la estancia mencionada.

Claudio Chavez

*Dedicado a
mis padres y hermanos.*

ÍNDICE GENERAL

Resumen	III
Summary	VII
Agradecimientos	XI
Agradecimientos Institucionales	XIII
Índice General	XVII
Índice de Figuras	XXI
Acrónimos	XXVII
1 Justificación y Metodología	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. General	2
1.3.2. Específicos	2
1.4. Alcance del Proyecto	3
1.5. Organización del Documento	3
	XVII

2	Generalidades	5
2.1.	Reseña del Dispositivo de Carga Acoplada (CCD)	5
2.2.	Principios Básicos del Dispositivo de carga acoplada	6
2.3.	Proceso de lectura de la imagen de un detector CCD	8
2.4.	Cálculo del valor pixel	11
2.4.1.	Doble muestreo correlacionado simple	11
2.4.2.	Otros metodos para el calculo del valor del pixel	13
2.5.	Pre-procesamiento de las imágenes de un detector CCD	17
2.5.1.	Corrección y recorte de la zona de <i>overscan</i>	18
2.5.2.	Sustracción del BIAS	18
2.5.3.	Sustracción de la corriente oscura	19
3	Estado del arte	21
3.1.	El experimento DAMIC (<i>Dark matter in CCDs</i> por sus siglas en inglés)	21
3.2.	El experimento CONNIE (<i>Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment</i>)	23
3.3.	Procesamiento de las imágenes	24
3.3.1.	Calibración del CCD	29
3.4.	El dispositivo de adquisicion actual de DAMIC y CONNIE	30
3.4.1.	Hardware	30
3.4.2.	Software	32
3.5.	El futuro sistema de adquisición para DAMIC y CONNIE	32
3.5.1.	El OTS DAQ	33
3.5.2.	Hardware de adquisición de imágenes	35
3.5.3.	Señales de video sin procesar (RAW)	37
4	Software de reconstrucción de imágenes	41
4.1.	Descripción detallada de partes de la señales de video	41
4.2.	Interfaz del software	45
4.3.	Flujo del software	45
4.4.	Descripción del proceso de detección de picos	50
4.5.	Descripción del proceso de auto-calibración	52
4.5.1.	Parámetros requeridos para la detección	53
4.5.2.	Características de las señales de CCD	54
4.5.3.	Flujo del proceso de auto-calibración	54
4.6.	Descripción del proceso de calculo de pixeles y conformación de lineas	57
4.7.	Descripción del proceso de guardado	59

5	Resultados	61
5.1.	Capacidad de reconstrucción de imagen	62
5.2.	Capacidad de auto-calibración	66
5.3.	Agregado de filtros y métodos de cálculo de píxeles	67
5.4.	Velocidad de procesamiento y uso eficiente de recursos de hardware	70
5.5.	Conclusiones y trabajos futuros	72
	5.5.1. Conclusiones	72
	5.5.2. Trabajos futuros	72
	Referencias	75

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Esquema original de Boyle y Smith con diagrama de tiempo para un CCD de tres fases.	6
2.2	Estructura de un pixel de un detector CCD. Se puede distinguir un potencial que se mantiene constante durante la exposición de manera a “atrapar” las cargas generadas.	7
2.3	Arreglo de elementos básicos conformando un CCD y sus elementos de lectura.	7
2.4	Esquema simplificado del circuito de lectura.	8
2.5	Movimiento de cargas durante el proceso de lectura de un sensor CCD. En la parte superior se muestra la secuencia de variación de los potenciales para desplazar las cargas entre pixeles. Seguidamente se muestran los patrones de pulsos que se deben administrar a las líneas de fase del CCD para producir la secuencia de potencial que mueven las cargas. Por ultimo en la figura inferior se muestra un esquema de las conexiones físicas de las líneas de fase entre pixeles adyacentes en el CCD.	10

2.6	Esquema de detector CCD con dos amplificadores de salida y fases independientes.	11
2.7	Señal de video extraída directamente de los amplificadores del CCD. Se observa la lectura de tres pixeles consecutivos. Se señala el período de medición de un pixel y los niveles de pedestal y signal, antes y después de la transferencia de carga.	13
2.8	Ruido típico de lectura del CCD+CDS con respecto a la frecuencia de pixel. Donde el ruido total S_{nn} es la suma en cuadratura del ruido gaussiano blanco S_{ww} y el ruido $1/f$ S_{ff} . Se observa que a bajas frecuencias el ruido $1/f$ es dominante.	15
2.9	Salida digitalizada de un CCD mostrando la fuerte correlación de las muestras centrales de un píxel (cercanas a la transición), mientras que las muestras situadas en los extremos no están correlacionadas.	16
2.10	Curva de coeficientes de pesos óptimos que minimizan el ruido de lectura. La muestra 0 sería la primera muestra que corresponde al pixel y la muestra 500 la última. Justo en el centro está la transición pedestal/signal	17
3.1	a) Diagrama de la sección transversal de un píxel de $15\ \mu m \times 15\ \mu m$ en un CCD retroiluminado completamente empobrecido. El espesor de la estructura de la puerta y el contacto óhmico de la parte trasera son $2\ \mu m$. La ventana trasera transparente, esencial para las aplicaciones astronómicas, se ha eliminado en los CCD DAMIC. b) Detección de materia oscura en un CCD. La partícula colisiona con un núcleo de silicio produciendo ionización en el volumen del detector. Los portadores de carga se desplazan a la deriva a lo largo de la dirección z debido a la acción del campo eléctrico y se recogen en las puertas CCD.	22
3.2	a) Un CCD DAMIC empaquetado. b) La caja de cobre que aloja los CCD. c) Componentes listos para insertarse en el recipiente de vacío. d) El recipiente dentro de la caja de plomo, durante la instalación del escudo de polietileno.	23
3.3	(a) Caja de cobre CCD. (b) Concepto de escudo completo. (c) Instalación completa dentro del contenedor en las inmediaciones del reactor nuclear Angra II.	24

3.4	Proceso de sustracción del <i>overscan</i> . En la imagen de la izquierda se observa la zona de <i>overscan</i> como una región de píxeles más oscuros hacia el lado derecho de la imagen. Una vez hecha la sustracción, esta zona es recortada como se muestra en la imagen de la derecha.	25
3.5	Proceso de cálculo de master BIAS. Se usan varias imágenes para calcular una única imagen que permite eliminar o minimizar al máximo las variaciones individuales pixel-pixel del <i>offset</i> .	26
3.6	Sustracción del master BIAS. Se sustrae numéricamente el master BIAS de cada una de las imágenes a ser analizadas.	26
3.7	Sustracción de ruido correlacionado. Se utilizan los espejos de ruido de la imagen actual y las dos imágenes siguientes para hacer una combinación ponderada y luego se sustrae esta del lado real de la imagen. Los pesos de las ponderaciones son calculados para minimizar la varianza de la imagen. Luego de este paso se la zona del espejo de ruido de la imagen.	27
3.8	Se observan los distintos tipos de <i>hits</i> cuya forma, tamaño e intensidad depende de la partícula que interactuó con la masa del CCD en esa zona.	28
3.9	Extracción de un <i>hit</i> de una imagen de CCD. Se muestra como se definen los umbrales de detección con respecto a la distribución del ruido gaussiano (σ es el valor cuadrático medio de ruido). Los píxeles cuyo valor superen 4 veces el valor cuadrático medio del ruido están en el nivel cero. Esto significa de que la probabilidad de que hayan alcanzado esos valores por causa del ruido es casi nula.	29
3.10	(a) Espectro capturado por un CCD cuando una fuente calibrada de rayos X de ^{55}Fe es colocada en frente. También se colocan materiales con otros elementos utilizados como referencia, para que los rayos X del ^{55}Fe generen los rayos X característicos de cada uno de esos elementos. (b) Correlación entre las energías medida por el CCD para cada elemento con las energías características de los elementos utilizados como muestra.	30
3.11	Ejemplo de aplicación genérica con arquitectura completa del Monsoon en un sistema de adquisición para múltiples CCDs.	31
3.12	Ejemplo de aplicación genérica del OTS DAQ en un sistema de adquisición utilizando una red IP para control, transferencia de datos, monitoreo y análisis usando interfaces web multiplataforma.	33

3.13	Interfaz Ethernet Off-the-Shelf. Es un modulo de firmware que permite que el firmware personalizado del sistema de adquisición se comuniquen con el servidor del OTS DAQ de forma transparente via puerto ethernet.	34
3.14	Interfaz web del OTS DAQ. Se puede observar la representación gráfica de la maquina de estado de software y la ventana de configuración.	35
3.16	Esquema del método usado hasta ahora para obtener las señales sin procesar (RAW). Se hace una derivación de la señal analógica para digitalizarla externamente. El software que se muestra es la propuesta de este trabajo.	37
3.15	Diagrama esquemático del prototipo de sistema de adquisición.	39
4.1	Se muestran los eventos en un pixel amplificado de una señal real. Estos eventos son el Inicio de Pixel (IDT), Valle de Suma (VS), tramos de pedestal, tramo de reset y de pedestal.	42
4.2	Se muestra el momento en que se empieza a transferir cargas desde el CCD. Este evento marca el inicio de imagen (IDI).	43
4.3	Se observa la forma de un Fin de línea (FDL).	44
4.4	Ejemplo de uso del software. Se llama al ejecutable y se indica el directorio en donde se encuentran los archivos de imagen. Estos tienen extensión "dat".	46
4.5	Ayuda del programa. Esta es desplegada en pantalla si se llama al software sin argumentos. El segundo mensaje de error es desplegado debido a que se proporcionó un directorio invalido o que no contiene archivos con extensión "dat".	47
4.6	Descripción gráfica de los pasos llevados a cabo para la generación de una imagen.	48
4.7	Se muestra la distorsión producida por un pixel saturado (nivel de tramo de <i>signal</i> mucho mayor a nivel de tramo de pedestal). Esta condición hace que algunos picos se detecten erróneamente como Inicios de Pixel (IDPs) o Valle de Sumas (VSs). Estos errores deben ser corregidos evaluando la distancia entre los IDPs y VSs detectados.	49

4.8	Se muestran los errores producidos al usar solamente un umbral de nivel como condición suficiente para un evento. Todas las muestras que superen ese nivel que están marcadas por el cuadro rojo cumplen la condición y podrían considerarse erróneamente como una muestra IDP o VS.	51
4.9	Se observa como un pico de Fin de línea (fdl) puede ser detectado como Fin de línea (FDL) si cumple la condición $Muestra(k - 2) < Muestra(k - 1) < muestra(k) > Muestra(k + 1) > Muestra(k + 2)$. Sin embargo, si solamente se evalúa esta condición, un tramo cualquiera de la señal afectado por ruido podría también ser detectado erróneamente como FDL por ejemplo.	52
4.10	Se muestra como los umbrales de VS y IDP establecidos para la señal de la derecha no son validos para la señal de la izquierda. Por lo tanto sería necesario que el software se auto-calibre para procesar la señal de la izquierda. En este caso ambas señales están invertidas por lo que los picos de VS son positivos.	53
4.11	Diagrama de flujo simplificado del proceso de auto-calibración.	55
4.12	Inicio de Imagen (IDI) distorsionado por transitorios. Debido a esto, la primera línea de la imagen debe ser descartada.	56
4.13	Umbrales para los eventos y las distancias descritas en la sección 4.1. En la parte a) se muestran los parámetros relacionados con la amplitud, mientras que en la parte b) muestra los parámetros relacionados con distancias (en numero de muestras).	58
5.1	Recorte de una imagen generada a partir de archivos producidos en Fermilab. La imagen original tiene una resolución que de 4000x4000 pixels y los archivos de señal superan los 10 GB.	62
5.2	Recorte de una imagen generada a partir de archivos producidos en Fermilab. La imagen original tiene una resolución que de 1250x549 pixeles y los archivos de señal superan los 1 GB.	63
5.3	Se muestra el mismo <i>hit</i> recortado desde una imagen con errores de alineación y en una correcta. La imagen a) es la que fue generada con errores. Nótese la diferencia con la imagen b).	64

5.4	Se observa un <i>hit</i> después de hacer el análisis con las herramientas de DAMIC. Se puede apreciar que la distribución de intensidades corresponde a un <i>hit</i> de electrón. Las intensidades son mayores en los pixeles interiores y va decayendo de forma difusa por los pixeles exteriores	64
5.5	Se muestran recortes de una imagen generada por software y de una imagen tomada para CONNIE con el Monsoon. Se puede apreciar como los <i>hits</i> de la imagen generada por software tienen las mismas características y distribución de intensidad que los <i>hits</i> en la imagen de CONNIE.	65
5.6	Se muestran dos señales tomadas con combinaciones de hardware distintas. Se puede observar grandes diferencias entre las amplitudes y formas de los eventos de Inicio de Pixel (IDP), Valle de Suma (VS) y Fin de Línea (FDL). La señal mostrada a la izquierda fue adecuada con un amplificador inversor. Debido a esto los IDP y VS tienen direcciones opuestas en las señales.	66
5.7	Efecto de la aplicación de un filtro pasabajas simple en los tramos de <i>signal</i> y pedestal. Se observa como dichos tramos quedan suavizados tras la aplicación de filtro.	67
5.8	Fragmento de código del software en donde se muestra de aplicación de un filtro digital. Las equivalencias en el código son $y_j \rightarrow yk$, $y_{j-1} \rightarrow yPass$, $\alpha \rightarrow alpha$ y $x_j \rightarrow *(filedata_{-}+j)$.	69
5.9	Datos de rendimiento de software durante la generación de una imagen sin filtrado digital añadido.	71

ACRÓNIMOS

CCD	<i>Charge-coupled devices</i>
CDS	Correlated double sampling.
DCDS	<i>Digital Correlated double sampling</i>
MO	Materia Oscura.
DAQ	<i>Data Aquisition system</i>
DAMIC	Dark Matter in CCDs
CONNIE	<i>Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment</i>
OTS	<i>Over The Shell</i>
VIB	<i>Vacuum Interface Board</i>
IOT	Internet of Things
CFITSIO	<i>C Fits Input/Output</i>
IDI	Inicio de Imagen
FDI	Fin de Imagen

XXVIII ACRÓNIMOS

IDP	Inicio de Pixel
VS	Valle de Suma
FDL	Fin de Linea
GT	Guarda de Transitorios
PD	Parámetros de Detección
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>

CAPÍTULO 1

JUSTIFICACIÓN Y METODOLOGÍA

1.1. Introducción

En este capítulo se exponen los objetivos y las razones de este trabajo, además de la organización del documento de forma a proporcionar una visión clara de la línea a seguir en los capítulos posteriores.

1.2. Motivación

La principal motivación que ha impulsado esta tesis es el aporte como institución y como país en el área de la investigación y desarrollo en el campo de la electrónica para la contribución a los experimentos DAMIC (Dark Matter in CCDs) y CONNIE (Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment).

En todo experimento de física de partículas es fundamental el análisis y comprensión máxima de las fuentes de ruido y su tratamiento, puesto que de ello dependerá la calidad de los resultados. Por un lado se trata de eliminar o mitigar el ruido de todas las fuentes

externas por medio de blindaje, ubicación adecuada y el diseño óptimo del hardware. Por otro lado también se deben usar técnicas de procesamiento, ya sea a nivel de software o hardware, para evitar que el ruido *intrínseco* afecte al análisis del experimento. Cada parte de software o hardware que se diseña abarca áreas de electrónica, procesamiento de señales y análisis de imágenes, por lo que genera una gran cantidad de conocimientos transferibles. Por medio de este trabajo se busca facilitar las herramientas para las personas que deseen realizar investigaciones donde se emplee la tecnología de los CCDs.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Desarrollar el software de procesamiento y reconstrucción de imágenes a partir de señales digitales de dispositivos de carga acoplada por medio de doble muestreo correlacionado.

1.3.2. Específicos

- Estudiar los principios de funcionamiento de los dispositivos de carga acoplada.
- Analizar el uso de los dispositivos de carga acoplada en los experimentos CONNIE y DAMIC.
- Estudio de algoritmos de procesamiento de señal para la detección de patrones.
- Definir especificaciones del software de procesamiento y reconstrucción offline de señales de CCDs.
- Implementar los algoritmos para el diseño del software en base a las especificaciones.
- Proveer fácil implementación de filtros para pruebas y optimización de parámetros y hardware.
- Análisis de resultados experimentales por medio de reconstrucción de señales de imágenes producidas y almacenadas en Fermilab y comparaciones con variaciones de las opciones de filtrado digital del software.

1.4. Alcance del Proyecto

En esta sección se establecen las fronteras del proyecto, con el fin de satisfacer los objetivos trazados por el mismo. Se citan las características principales del software esperadas al finalizar este trabajo.

- El software propuesto procesará señales offline. Es decir, señales que previamente han sido digitalizadas y almacenadas.
- El permitirá la implementación con facilidad de cualquier filtro estático o dinámico. Aunque en este trabajo no se ha diseñado ningún filtro, si se proveen los medios de tal forma a que se introduzcan con modificación mínima del software-.
- Con la herramienta desarrollada en este trabajo se podrá optimizar el diseño del hardware a ser utilizado en las futuras versiones de los experimentos DAMIC y CONNIE, donde se van a emplear varios detectores CCDs simultáneamente.

1.5. Organización del Documento

En el Capítulo 1 se detallan la justificación y metodología del trabajo de investigación. Se realiza una presentación del mismo y las motivaciones que impulsaron al desarrollo del tema del trabajo.

Posteriormente en el Capítulo 2, se brinda la información esencial sobre los dispositivos de carga acoplada, funcionamiento básico y las tecnologías y conceptos ligados a la generación de una imagen.

En el Capítulo 3 se presenta el estado del arte, abarcando los experimentos a los que este trabajo va dirigido, las tecnologías utilizadas, los planes para las nuevas versiones de los experimentos, la descripción de la problemática y la utilidad de este trabajo.

A continuación, en el Capítulo 4, se describe en detalle las características de una señal de video crudo (*RAW*) obtenido a la salida de un CCD con sus partes y variaciones generales, y también se describe en detalle el software de procesamiento offline de señales RAW de CCDs y su uso como herramienta de investigación.

En el Capítulo 5 se presentan los resultado de varias pruebas realizadas con imágenes digitalizadas en el Fermi National Accelerator Laboratory. También se muestran los datos de rendimiento del software y se ofrecen las conclusiones generales.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES

La adquisición de imágenes con detectores CCDs engloba varios campos, entre ellos la óptica, la electrónica, el procesamiento de señales y el procesamiento de imágenes. Si bien la profundidad con que se incursiona en cada campo varía según la aplicación, siempre es necesario pasar por todos ellos para obtener información válida desde este tipo de detectores. Por ejemplo un CCD utilizado para vídeo de alta velocidad no requerirá el mismo procesamiento de imágenes que uno utilizado para un telescopio que realiza exposiciones de horas para cada imagen. Se introducen los conceptos básicos necesarios para el entendimiento del problema tratado.

2.1. Reseña del Dispositivo de Carga Acoplada (CCD)

La tecnología CCD fue inventada por Willard S. Boyle y George E. Smith, según se cuenta, en una tormenta de ideas frente a una pizarra de los laboratorios Bell el 19/09/1969. Boyle y Smith ganaron el Premio Nobel de Física en 2009, al demostrarse la utilidad y

trascendencia de su idea. El esquema original de Boyle hecho a mano se muestra en la Figura 2.1.

Aunque los CCDs fueron originalmente concebidos como un dispositivo de memoria, se hizo inmediatamente claro para algunos que los CCDs tenía usos potenciales que iban mucho más allá de las simples aplicaciones de memoria. En el pasado, la película fotográfica fue el principal competidor del CCD como detector de imágenes debido a que su costo, rendimiento y facilidad de uso estaban bien establecidos. Sin embargo, un factor histórico que colocó al CCD como líder fue la necesidad comercial de un detector de imagen *electrónico* “de estado sólido” para reemplazar los detectores de tipo tubo. Las ventajas del CCD se basaron en su tamaño, peso, bajo consumo de energía, ruido ultrabajo, linealidad, rango dinámico, precisión fotométrica, respuesta espectral amplia, estabilidad geométrica, fiabilidad y durabilidad, Velocidad de fotogramas, calidad cosmética y costo [1].

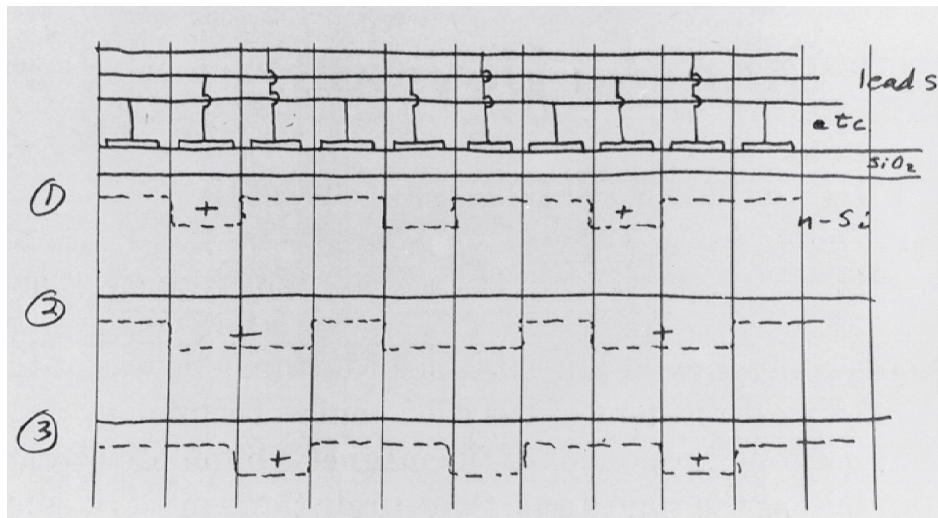


Figura 2.1 Esquema original de Boyle y Smith con diagrama de tiempo para un CCD de tres fases.

Fuente: [1]

2.2. Principios Básicos del Dispositivo de carga acoplada

Un detector CCD consiste en un arreglo bidimensional de estructuras conductor-óxido-semiconductor (capacitores MOS) próximos unos de otros llamados pixeles. El pixel genera la menor unidad homogénea en nivel que forma parte de una imagen digital. En la

Figura 2.2 se muestra la estructura de un pixel. Al manipular las tensiones de compuerta de cada MOS, los paquetes de carga eléctrica pueden ser almacenados y transferidos entre los capacitores. Los CCD se usan ampliamente en detección de radiación electromagnética dentro del espectro visible el infrarrojo, en donde los paquetes de carga son creados por el efecto fotoeléctrico en la interacción de los fotones con los electrones de la banda de valencia del semiconductor (generalmente silicio). En las aplicaciones en las que se centra este trabajo, el movimiento de partículas ionizantes en el volumen del CCD crean pares electrón-hueco durante su trayectoria, que se almacenan como paquetes de carga [2].

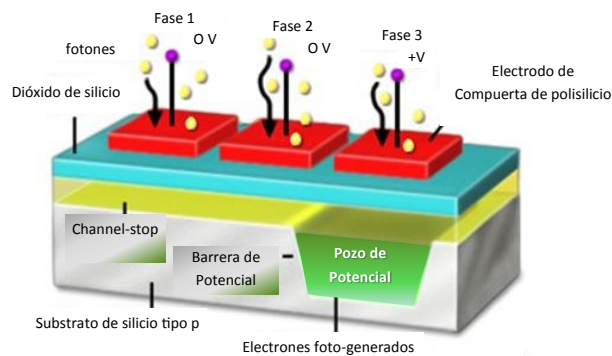


Figura 2.2 Estructura de un pixel de un detector CCD. Se puede distinguir un potencial que se mantiene constante durante la exposición de manera a “atrapar” las cargas generadas.

Produciendo un arreglo del mismo elemento mostrado en Figura 2.2 de una o dos dimensiones se tiene un detector CCD como se muestra en la Figura 2.3

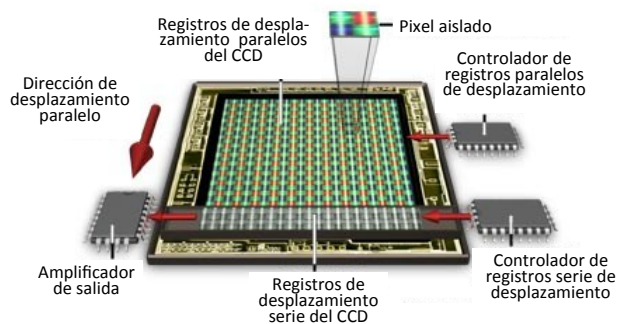


Figura 2.3 Arreglo de elementos básicos conformando un CCD y sus elementos de lectura.

2.3. Proceso de lectura de la imagen de un detector CCD

Desde el punto de vista técnico el CCD debe realizar cuatro tareas para generar una imagen.

1) Generación de carga: En el área activa del detector, el CCD captura la luz de estímulo o una partícula ionizante y la convierte en cargas electrónicas en sitios discretos llamados píxeles.

2) Colección de carga: En el registro de desplazamiento, el CCD mueve los paquetes de carga dentro del sustrato de silicio.

3) Transferencia de carga: En el nodo de salida, las cargas se convierten en voltaje y se amplifican. Para las mediciones científicas cuantitativas es importante no perder ninguna carga durante el proceso de transferencia ya que esto representaría una pérdida de información.

4) La última operación que se produce durante la formación de imágenes CCD es la detección y medición de la carga recogida en cada píxel. Esto se logra descargando la carga sobre un condensador pequeño conectado a un amplificador MOSFET de salida. Este punto en el CCD se llama el “sense node” o “diodo de salida”. El amplificador MOSFET es el único elemento activo que requiere potencia. La matriz de píxeles del CCD en sí es pasiva, ya que se compone de condensadores MOS. El amplificador de salida genera una tensión para cada pixel proporcional a la carga de señal transferida [1].

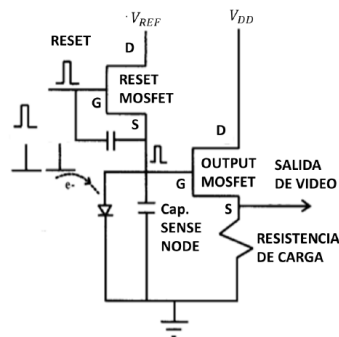


Figura 2.4 Esquema simplificado del circuito de lectura.

Fuente: [2]

En la Figura 2.4 se muestra un esquema simplificado del circuito de lectura. Los amplificadores se alimentan con dos tensiones, la tensión de drain del transistor de reset ($V_{REF} = -12,5 \text{ V}$), que es el valor al que se carga el capacitor de medición previamente a transferir la carga del pixel, y la tensión de drain del MOSFET de salida ($V_{DD} = -22 \text{ V}$)

que, junto con la resistencia de carga (20 kOhm), ajusta la ganancia del amplificador. La señal amplificada se envía mediante un cable coaxial desde la salida de video hasta un hardware que la digitaliza [2].

Como se mencionó anteriormente, la detección y medición de la carga es la última operación que se produce en la generación de la imagen. Es decir, que antes de que ésta se genere, la carga debe ser transferida hasta el amplificador de salida mostrado en la Fig. 2.4. Durante la “exposición” del detector a las partículas que quieren capturar en imagen, los potenciales se mantienen fijos de forma a crear una “trampa” para las cargas generadas como se muestra en la Figura 2.2.

Al finalizar la exposición del detector, se colocan los conductores que conectan estos potenciales, que llamamos fases, a unos potenciales variables de forma a ir moviendo las cargas a lo largo de la matriz que conforma el CCD. Este movimiento puede ser vertical, desplazando todas las cargas verticalmente por fila hacia arriba o hacia abajo utilizando las fases paralelas (*parallel clocks*), esto se utiliza para ir moviendo las cargas fila por fila hasta el registro de desplazamiento horizontal en donde se hará la lectura de esa fila pixel por pixel. Utilizando las fases horizontales (*horizontal clocks*) se desplazan las cargas horizontalmente para llevarlas al amplificador de salida. En la Figura 2.5 se grafica este proceso. Donde ϕ_1, ϕ_2 y ϕ_3 representan las tensiones aplicadas a las fases horizontales. Se puede ver como el patrón trifásico produce que las cargas se vayan moviendo horizontalmente, y que, controlando la frecuencia y los desfases relativos de las líneas es posible controlar la velocidad de movimiento de la carga de pixel a pixel, y también la dirección del movimiento. Un proceso análogo ocurre en las transferencias verticales de carga, pero en este caso toda una fila es transferida a la fila superior o inferior.

La figura 2.5 muestra un patrón de tensión mas bien teórico, ya que en la practica existen problemas referentes a la transferencia imperfecta de las cargas. Por lo tanto, los valores de tensión en las fases difieren ligeramente de los teóricos. Esto es debido a que la perdida de carga durante la transferencia es mayor cuanto mas se rápido se hace el “*clock out*” de las cargas. Además, para asegurar una mejor transferencia tanto vertical como horizontal, puede que los pulsos observados en las fases en Figura 2.5 se solapen en el tiempo y que no tengan la misma duración. Esto dependerá de la aplicación en la que se esté usando el detector, puesto que no es lo mismo transferir cargas producidas por la tenue luz de una lejana galaxia en el espacio que de las de un brillante objeto en la atmósfera terrestre. En el primer caso se querrá maximizar la transferencia de carga a modo de no perder información, mientras que en el segundo, la perdida de unas cargas será imperceptible. Esto implica que para maximizar el uso de las cargas almacenadas en la formación de una imagen se tendrá que hacer una lectura lenta. Con un CCD de 4000 x 4000 pixeles una lectura lenta puede tardar hasta 30 minutos. Es por eso que en la mayoría

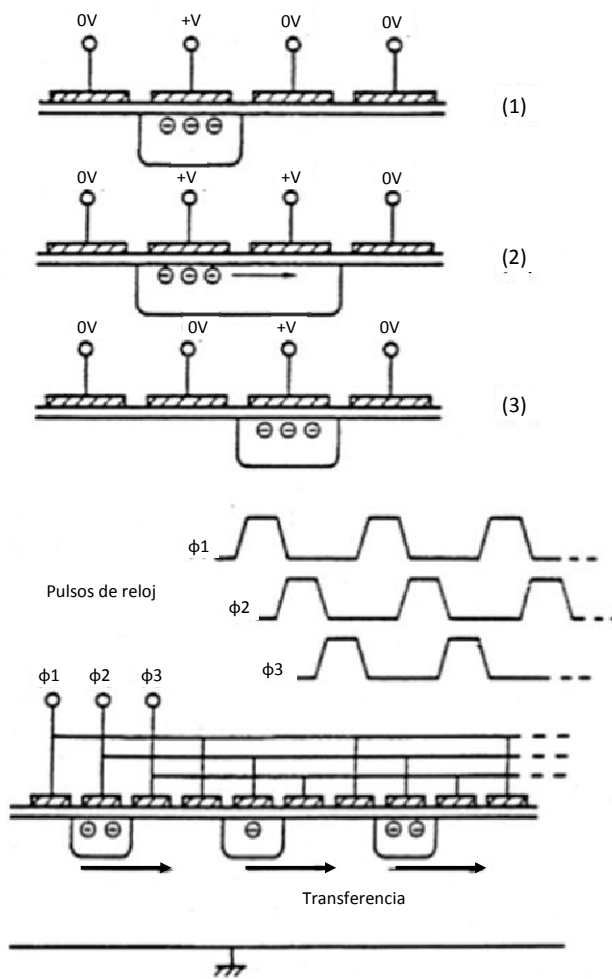


Figura 2.5 Movimiento de cargas durante el proceso de lectura de un sensor CCD. En la parte superior se muestra la secuencia de variación de los potenciales para desplazar las cargas entre pixeles. Seguidamente se muestran los patrones de pulsos que se deben administrar a las líneas de fase del CCD para producir la secuencia de potencial que mueven las cargas. Por ultimo en la figura inferior se muestra un esquema de las conexiones físicas de las líneas de fase entre pixeles adyacentes en el CCD.

de los CCDs comerciales y científicos, el área sensible se divide en varias secciones, con las fases horizontales y verticales independientes y un amplificadores de salida por sección. Esto permite a un CCD científico un menor tiempo de lectura, aunque para otros casos la lectura rápida es obligatoria como en un CCD de una cámara de video de alta tasa de

cuadros por segundo. En la Figura 2.6 se observa un CCD con dos amplificadores de salida y fases verticales y horizontales independientes.

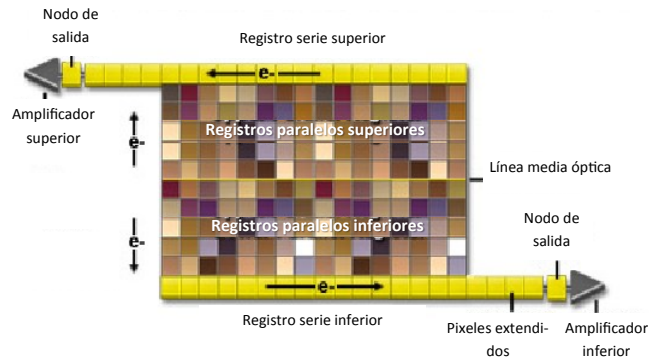


Figura 2.6 Esquema de detector CCD con dos amplificadores de salida y fases independientes.

2.4. Cálculo del valor pixel

El producto final de una adquisición de un sensor CCD es una matriz numérica que representa una imagen. Cada elemento numérico de esa matriz representa un valor que se obtuvo de un pixel del sensor CCD proporcional a la carga que este acumuló durante la exposición. El proceso de obtener dicho valor de un pixel individual se denomina cálculo del valor del pixel y existe más de un método para realizarlo.

2.4.1. Doble muestreo correlacionado simple

Las señales de salida de CCDs son señales analógicas discretas que incluyen no sólo señales de tensión efectivas producidas por las cargas, sino también señales de ruido. Los ruidos provienen principalmente de dos fuentes [3]:

1. Ruido inherente del dispositivo del CCD, que incluye:
 - Ruido del fotón: La recolección de cargas en el pozo de potencial del pixel es un proceso aleatorio debido a la aleatoriedad de la emisión de los fotones que las producen. Este tipo de ruido depende de la propiedad del fotón;
 - Ruido de disparo: Las cantidades de cargas de señal producidas por unidad de tiempo no son las mismas siempre. Cuando la fluctuación aleatoria del flujo de fotones llega al sensor CCD, producirá ruido de disparo;

- Ruido de la corriente oscura: I es una corriente eléctrica relativamente pequeña que fluye a través del CCD incluso cuando no está recibiendo luz. La corriente de oscuridad se debe a la generación aleatoria de electrones y huecos y aumenta con la temperatura. Este tipo de ruido puede causar manchas blancas en la imagen
2. Ruido producido durante el proceso de lectura de la señal del CCD (*Reset Noise*): antes de medir la carga de cada píxel, el condensador de lectura (*sense capacitor*) se restablece a un nivel de referencia o mas conocido como nivel de pedestal, pero este nivel siempre se desvía del valor ideal debido a la influencia del interruptor de *reset*. Esta desviación se denomina ruido de reinicio.

En el sistema de adquisición de señal, la señal de salida CCD debe ser procesada para reducir estos ruidos que se han mencionado anteriormente. Según la característica del CCD, la técnica de muestreo CDS se utilizará para la eliminación del ruido. El principio básico del CDS es que la señal de video se muestrea dos veces durante un ciclo de píxeles, y las partes de la señal muestreada se transfiere al amplificador diferencial. Los resultados muestran que la técnica CDS restringe no sólo el ruido de reset sino también otros ruidos [3].

El doble muestreo correlacionado (CDS por su siglas en ingles) estándar fue introducido por White y otros en [4] como técnica de procesamiento de señal para la eliminación de transitorios de conmutación (*reset*) y eliminación del ruido de Nyquist, ambos asociados con circuitos de detección de carga empleados en los CCDs. Una ventaja adicional es la atenuación de la componente de ruido $1/f$ en los circuitos sensores de carga debido al cero en la función de transferencia de ruido CDS en el origen ($\omega = 0$). El efecto del circuito CDS sobre el ruido de reinicio (*reset*) y el ruido de Johnson-Nyquist (blanco) en el circuito asociado ha sido descrito adecuadamente en [5].

En la Figura 2.7 se muestra la señal de video generada durante la lectura de tres píxeles consecutivos de un CCD. En la misma se distingue el período de lectura de cada píxel, el nivel de referencia (pedestal), y el nivel de señal o carga (signal). los picos negativos marcados se producen en el momento en que se transfiere de la carga desde el píxel del CCD al capacitor de lectura (*sense-node capacitor*) en cada periodo de píxel.

El muestreo doble correlacionado digital, o DCDS, es la versión mejorada del CDS que está siendo cada vez mas utilizado en los CCDs de alto rendimiento, desplazando a técnicas analógicas como el “*Analog dual slope integration*” y el “*Clamp and sample*”. La DCDS sobremuestrea la señal de salida del CCD para obtener y sustraer el nivel de *signal* de un píxel (condición desconocida), desde el nivel de pedestal

(condición conocida). Varias muestras son usadas en el tramo de pedestal y en el de *signal* a fin de obtener el valor medio de la señal y reducir de esta manera el ruido. Es decir, las muestras de cada parte de la señal (pedestal y señal) se muestrean a alta velocidad y se calcula una suma o promedio para cada parte usando el mismo peso para cada muestra.

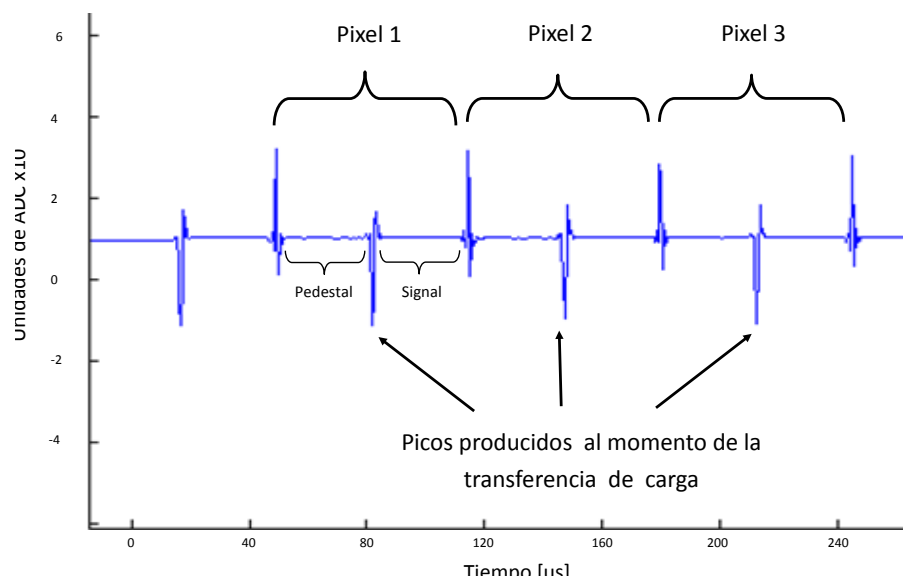


Figura 2.7 Señal de video extraída directamente de los amplificadores del CCD. Se observa la lectura de tres píxeles consecutivos. Se señala el período de medición de un pixel y los niveles de pedestal y señal, antes y después de la transferencia de carga.

2.4.2. Otros metodos para el calculo del valor del pixel

Por lo general, los CCDs se leen con muestreo doble correlacionado (CDS). Para cada píxel se busca medir la diferencia entre un nivel de referencia, denominado nivel de pedestal, y el propio nivel de señal, que son tensiones secuencialmente presentes en la salida de un CCD. Esto se hace necesario por el método de conversión de carga de píxeles utilizado dentro del circuito de lectura del CCD. Existen también otras técnicas, como la integración de rampa doble (*clamp-and-sample*), que no serán tratadas aquí, pero que son

equivalentes al sistema CDS en términos de función de transferencia y procesamiento de señal.

Para limitar el ruido de lectura, se coloca antes del dispositivo CDS un pre filtro de paso bajo de primer orden con ancho de banda correctamente ajustado. La señal de salida del CDS se convierte entonces en una señal digital con un convertidor analógico-digital (A / D).

En este sistema de ancho de banda limitado, el ruido total e_{nt} obtenido en la salida del dispositivo puede expresarse como:

$$e_{nt} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} e_n(f)^2 df}$$

donde f_1 y f_2 son las frecuencias de corte baja y alta de -3 dB, y $e_n(f)$ es la densidad de ruido de voltaje en la etapa de salida del CCD. Es posible demostrar que para un CDS simple se cumple [6]:

$$f_1 = \frac{1}{2}f_c$$

$$f_2 = \frac{3}{2}f_c$$

Donde f_c es la frecuencia del CDS, que es equivalente a la frecuencia de pixel (el recíproco del tiempo de duración de un pixel completo en la señal). La ganancia del CDS será 2, con un pico de ganancia en f_c .

Si se observa una curva típica de $e_n(f)$ como la de la Figura 2.8, se distinguen dos diferentes regiones. Para las altas frecuencias, $e_n(f)$ es casi constante, es decir, tiene características de ruido blanco. Para frecuencias mas bajas, $e_n(f)$ tiene un componente dominante $\frac{1}{f}$, lo que implica que el ruido tiene características de ruido rosa.

En el caso de ruido blanco con densidad espectral constante e_{n0}^2 , una buena aproximación del ruido total e_{nt} se puede escribir como [6]:

$$e_{nt} = 2e_{n0}\sqrt{f_c}$$

en el caso del ruido ruido rosa, cuya densidad es e_{n1}^2/f , el ruido total sería:

$$e_{nt} = 2e_{n1}\sqrt{\ln(3)} \approx 2e_{n1}$$

Esto muestra claramente que a altas frecuencias, la reducción de f_c , la frecuencia del reloj de pixel (tiempo de pixel), disminuye el ruido de lectura del CCD. Sin embargo, para

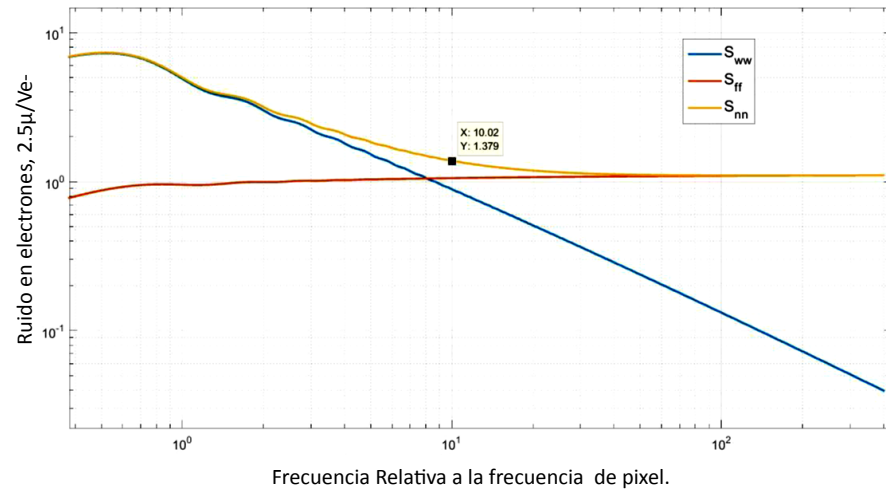


Figura 2.8 Ruido típico de lectura del CCD+CDS con respecto a la frecuencia de pixel. Donde el ruido total S_{nn} es la suma en cuadratura del ruido gaussiano blanco S_{ww} y el ruido $1/f$ S_{ff} . Se observa que a bajas frecuencias el ruido $1/f$ es dominante.
Fuente: [7]

bajas frecuencias el ruido de lectura tiende a volverse constante, lo cual quiere decir que la reducción la velocidad de lectura del CCD no mejorara el ruido a partir de este punto.

Por lo tanto se puede decir que hay una barrera física (llamado de piso de ruido) el cual es intrínseco a la técnica de lectura CDS, que no puede ser mejorada sin importar la calidad de la electrónica usada.

Es por esto que para alcanzar un menor ruido de lectura a la misma frecuencia de lectura, y para tener un menor ruido que el esperado para un CCD dado, es necesario usar una técnica diferente.

Como se ve en la figura 2.9, las muestras cerca de las transiciones pedestal/signal están mucho mas correlacionadas que aquellas que están mas alejadas de la transición (que en teoría son niveles constantes).

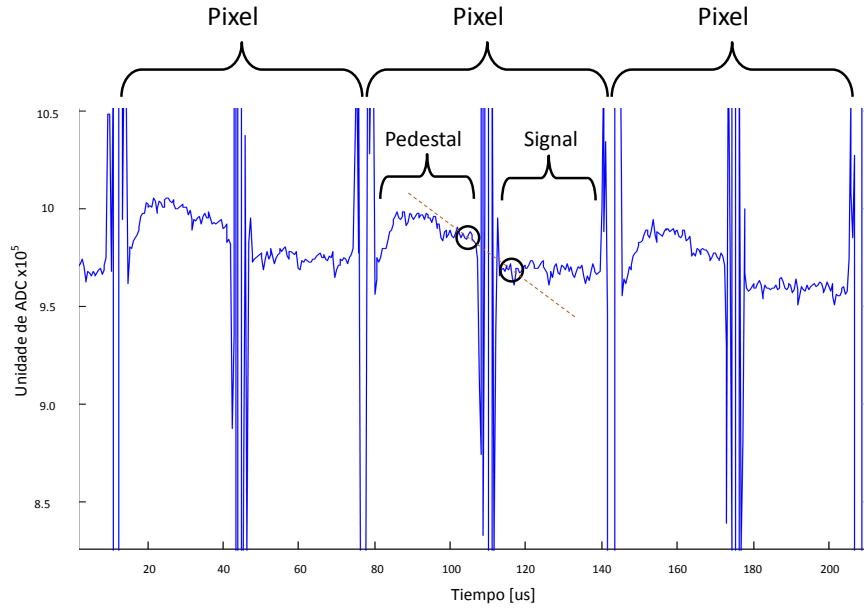


Figura 2.9 Salida digitalizada de un CCD mostrando la fuerte correlación de las muestras centrales de un píxel (cercanas a la transición), mientras que las muestras situadas en los extremos no están correlacionadas.

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, se puede decir que las muestras cerca de la transición mencionada tienen mejor calidad que las demás. Una posibilidad sería dar mas pesos a estas sub-muestras en lugar de hacer el promedio del valor de las muestras en el pedestal (o signal), que es equivalente a un CDS clásico. Para dar mas pesos a las muestras centrales es necesario usar coeficientes mayores para las muestras centrales (cercanas al pico que se produce al transferir la carga del CCD), y que irían decayendo al alejarse. Al hacer la sumatoria y normalizar el resultado con la sumatoria de todos los coeficientes utilizados se mantiene la ganancia del sistema con un mismo valor. Esto se expresa en la siguiente fórmula:

$$pixel = \frac{\sum_n^{2n-1} \alpha_i S_i}{\sum_n^{2n-1} \alpha_i} - \frac{\sum_0^{n-1} \alpha_i P_i}{\sum_0^{n-1} \alpha_i}$$

Donde α_i es el i -ésimo coeficiente de peso, S_i y P_i las i -ésimas muestras de los niveles de *signal* y pedestal respectivamente en un píxel de $2n$ muestras de duración. Los mejores coeficientes son elegidos usando un algoritmo que utiliza ruido de lectura como función de costo. La Figura 2.10 muestra una curva que representa los coeficientes encontrados que no se pueden definir con una sola función matemática. La línea vertical

de división sería la transición pedestal-signal en una señal de salida de CCD. Usando los coeficientes encontrados con este método, el ruido de lectura ha sido reducido a 1.7 electrones en el equipo de prueba. Según estudios realizados en [6], la linealidad pasó de 1000 partes por millón a 100 partes por millón. Esto es consecuencia de que al aplicar este método, se obtiene una señal digitalizada cerca del detector y no se requiere que ésta pase por las etapas de amplificación y procesamiento analógico, donde se observan los efectos de no linealidad [6].

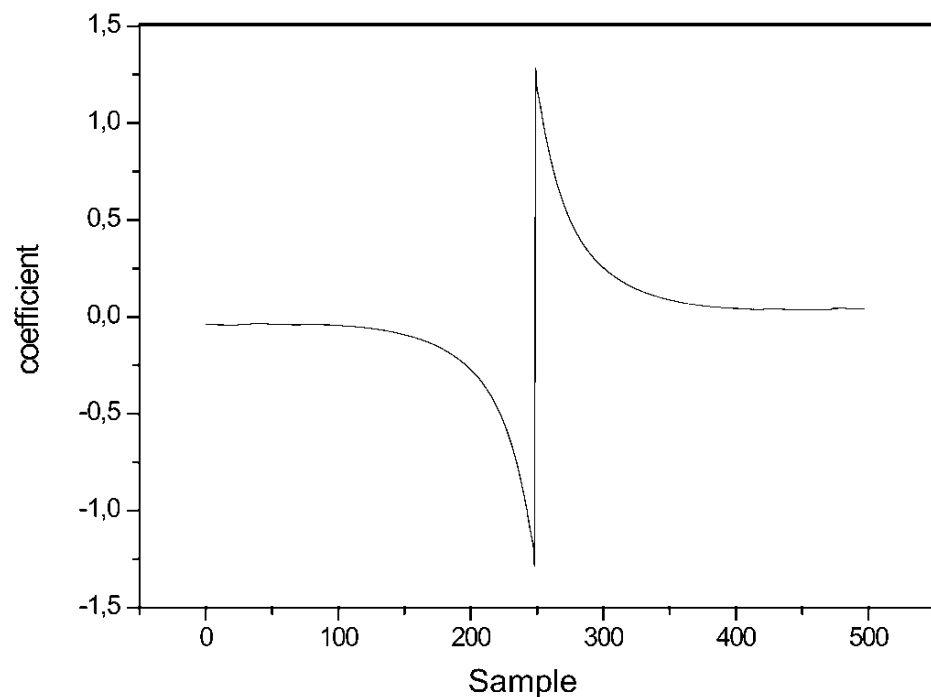


Figura 2.10 Curva de coeficientes de pesos óptimos que minimizan el ruido de lectura. La muestra 0 sería la primera muestra que corresponde al pixel y la muestra 500 la última. Justo en el centro está la transición pedestal/signal

Fuente: [6]

2.5. Pre-procesamiento de las imágenes de un detector CCD

Una imagen bruta de un CCD no se puede analizar directamente; se deben tomar varias medidas para procesar previamente los datos antes del análisis. Los pasos básicos de pre-procesamiento son: corrección y recorte de *overscan*, eliminación del BIAS, y la eliminación de la corriente oscura. Cada uno de ellos se describe a continuación.

2.5.1. Corrección y recorte de la zona de *overscan*

El valor de los píxeles en una imagen CCD de duración cero (sin exposición) se considera que consta de tres componentes. El primero es un gran *offset*, simplemente el nivel medio de todos los píxeles de la imagen. El componente de *offset* se conoce como el “nivel de *overscan*”, y varía de imagen a imagen de forma impredecible con la temperatura y el tiempo de exposición del CCD. Esto es puramente un *offset*, y no tiene un ruido asociado. El segundo componente de una imagen sin exposición es el BIAS. Este representa las variaciones individuales de píxel a píxel del nivel de *offset*. El BIAS a menudo tiene algún tipo de patrón en el CCD, y no parece aleatorio, generalmente el mismo es fijo a pesar de las variaciones en el valor de *offset* medio. Es decir, aparte de los efectos de ruido, la diferencia entre el valor de un píxel dado y el nivel de *overscan* de toda la imagen es fija, independientemente del valor del nivel de *overscan*. El tercer componente de una exposición de duración cero es el ruido de lectura, que es producido por el amplificador conectado al CCD, ya que el simple acto de leer los píxeles genera una pequeña cantidad de ruido. La eliminación del nivel de *overscan* y del BIAS se tratan usualmente como pasos de pre-procesamiento separados.

La sustracción del nivel de *overscan* se hace analizando la señal registrada en un conjunto de píxeles conocidos como la región de *overscan*. Estos píxeles (que normalmente aparecen en una tira a lo largo de uno o más lados de una imagen CCD) son píxeles adicionales generados por la electrónica del CCD cuando el este se lee. No están conectados de ninguna manera a los píxeles físicos reales en el CCD - corresponden a ubicaciones en la cuadrícula de píxeles que realmente no existen. El nivel medio de los píxeles en la región de *overscan* proporciona así una medida de la señal media introducida por lectura del CCD, es decir, el nivel de *overscan*. Una vez que este nivel se ha calculado, se debe sustraer de todos los píxeles en la imagen; una imagen con este nivel eliminado se considera “corregida”. Luego se puede recortar la región de *overscan* (manteniendo esos píxeles que corresponden a píxeles reales expuestos a luz o partículas). Este proceso de corrección y recorte de la zona de *overscan* se debe hacer a todas las imágenes antes de cualquier otro pre-procesamiento.

2.5.2. Sustracción del BIAS

Después de que el *overscan* haya sido eliminado de una imagen y la misma haya sido recortada, el siguiente paso es eliminar el BIAS. Dado que el mismo varía a través del CCD, se debe utilizar una imagen BIAS BIAS para eliminar la estructura del BIAS de otras imágenes. Una forma de obtener una imagen de BIAS es simplemente tomando

una imagen con una exposición de cero segundos. En este caso, el CCD no está expuesto a ninguna luz, por lo que la señal medida es simplemente el BIAS (+ *overscan*, que debe ser eliminado antes de utilizar la imagen BIAS para corregir las demás imágenes con exposición). En la práctica, generalmente se adquieren múltiples imágenes de BIAS (típicamente 6 a 10) y luego se utiliza un promedio de estas imágenes (“*master BIAS*”) para corregir todas las otras imágenes. Este proceso de promediado asegura que la relación señal / ruido (S / N) de la imagen de *master BIAS* es suficientemente buena para que el proceso de corrección (de-BIAS) no introduzca ruido adicional significativo en las imágenes corregidas.

2.5.3. Sustracción de la corriente oscura

La señal registrada en cada píxel en un CCD puede, en algunos casos, tener un componente adicional que no tiene nada que ver con el número de electrones desprendidos por los fotones o partículas que golpearon a los átomos del detector. Esa señal puede ser esencialmente ruido térmico, o corriente oscura: el movimiento de los átomos (debido a la excitación térmica) en el material del propio CCD es quien provoca una cierta deposición de carga en los píxeles. Para mitigar este efecto, todos los CCD utilizados en astronomía se enfrían a temperaturas muy bajas. Los CCDs en experimentos de ultra bajo ruido se enfrían hasta alcanzar temperaturas de aproximadamente -150°C , y tienen una corriente oscura insignificante. Los CCDs menos costosos o de experimentos con menos requerimientos se enfrían termoeléctricamente (normalmente de -30° a -50°C), y tienen una corriente oscura significativa que debe eliminarse.

Para eliminar la imagen oscura actual, se debe, como en la eliminación del BIAS, adquirir una trama separada que tiene sólo la señal de corriente oscura. Esto se hace tomando una exposición de la misma duración que las imágenes para ser procesada, pero manteniendo el obturador del CCD cerrado. Esto asegura que ninguna luz alcance el CCD, por lo que la única señal grabada es la corriente oscura. Es extremadamente importante que las imágenes de corriente oscura tengan exactamente la misma duración que las imágenes a las que se aplicará la corrección. La corriente oscura es un fenómeno que depende del tiempo; una exposición de larga duración tendrá más corriente oscura que una corta. Las imágenes para la corrección de corriente oscura también deben tomarse a la misma temperatura que las imágenes a las que se aplicarán. El procedimiento típico para el uso de imágenes de corrección de corriente oscura es adquirir varias exposiciones (de 6 a 10 es suficiente) y la media de ellas para construir una imagen de corrección maestra. A diferencia de las imágenes del BIAS, uno puede terminar con más de una imagen maestra para la corriente oscura, cada una con un tiempo de exposición diferente. Se debe tener

en cuenta que las imágenes de corrección de corriente oscura individuales deben estar corregidas respecto al *overscan*, el BIAS y recortada antes de la construcción de una imagen de corrección maestra.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE

3.1. El experimento DAMIC (*Dark matter in CCDs por sus siglas en inglés*)

El experimento DAMIC utiliza la propiedades de los CCDs para poder identificar a los *retrocesos nucleares*, estos son procesos en donde las partículas a ser descritas colisionan con los átomos que componen el detector (Silicio en este caso). Debido al impacto, el núcleo de Silicio retrocederá y en su camino cederá la energía recibida a los electrones que estén en sus alrededores, ocasionando así una avalancha de portadores de carga que serán proporcionales a la energía cedida por la partícula que interactuó con el detector.

Los CCDs poseen un muy bajo ruido de lectura, lo que sumado a su masa relativamente alta, los convierten en instrumentos ideales para la búsqueda de partículas con energías de escala de keV y menores lo que implica que las partículas de MO buscadas en este experimento sean menores a $10 \text{ GeV}/c^2$ [8, 9].

En la Figura 3.1 se ilustra las características de un pixel de los CCDs utilizados y el concepto de búsqueda de materia oscura (representado aquí a través de un WIMP (*Weak Interaction Massive Particle*) con un CCD.

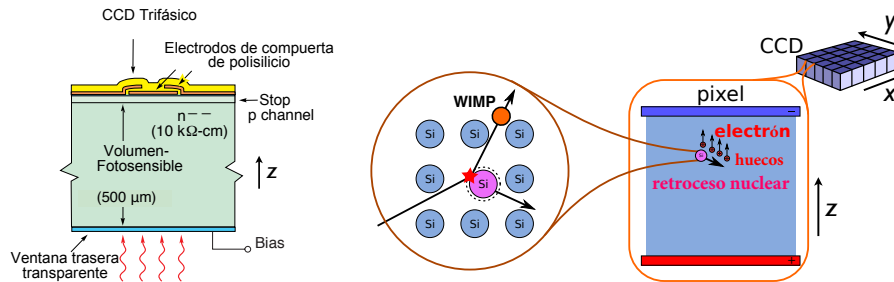


Figura 3.1 a) Diagrama de la sección transversal de un píxel de $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ en un CCD retroiluminado completamente empobrecido. El espesor de la estructura de la puerta y el contacto óhmico de la parte trasera son $2\ \mu\text{m}$. La ventana trasera transparente, esencial para las aplicaciones astronómicas, se ha eliminado en los CCD DAMIC. b) Detección de materia oscura en un CCD. La partícula colisiona con un núcleo de silicio produciendo ionización en el volumen del detector. Los portadores de carga se desplazan a la deriva a lo largo de la dirección z debido a la acción del campo eléctrico y se recogen en las puertas CCD.
Fuente: [8, 9]

Los CCDs de DAMIC cuentan con una estructura de compuerta de polisilicio trifásica con un canal p enterrado. Los CCD son típicamente 8 o 16 Mpixels, con un tamaño de $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ y con una superficie total de decenas de cm^2 . Estos tienen un grosor de $675\ \mu\text{m}$, y una masa de 5,2 g. Un silicio de tipo n de alta resistividad ($10\text{-}20\ \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) permite una baja densidad de donantes en el sustrato (aproximadamente $10^{11}\ \text{átomos}/\text{cm}^3$), lo que conduce a un funcionamiento adecuado a valores bajos de la tensión de polarización aplicada (aproximadamente 40 V para un CCD de $675\ \mu\text{m}$ de espesor).

La Figura 3.2 muestra la infraestructura instalada en SNOLAB. Un CCD empaquetado de 8 Mpíxeles (de $2\text{k} \times 4\text{k}$), y $675\ \mu\text{m}$ de grosor se muestra en la figura 3.2a. El dispositivo se pega a una pieza de soporte de silicio de alta pureza. El cable flexible de señal *Kapton* lleva las señales de los CCD hasta la tarjeta de interfaz de vacío (VIB por sus siglas en inglés). El cable también está pegado al soporte de silicio. Una barra de cobre facilita la manipulación del contenedor de los CCDs y su inserción en una ranura de una caja de cobre electropulida (Figura 3.2b). La caja se enfría a 140 K dentro de un recipiente de vacío a 10^{-6} mbar. Un bloque de plomo de 18 cm de espesor colgando de la brida del recipiente protege los CCD de la posible presencia de radiación introducida por los componentes de la VIB (figura 3.2c). Los CCD están conectados a la VIB a través de cables flexibles *Kapton*, que están situados al lado del bloque de plomo. El recipiente de vacío se inserta en un castillo de plomo (figura 3.2b) de 21 cm de espesor para aislar a los CCD de los rayos gamma ambientales. El castillo de plomo está a su vez rodeado por 60 cm de polietileno utilizado para aislar al sistema de detección de los neutrones

provenientes de las fuentes radiactivas naturales, como son las rocas que forman la pared de la caverna, y el suelo [8,9].

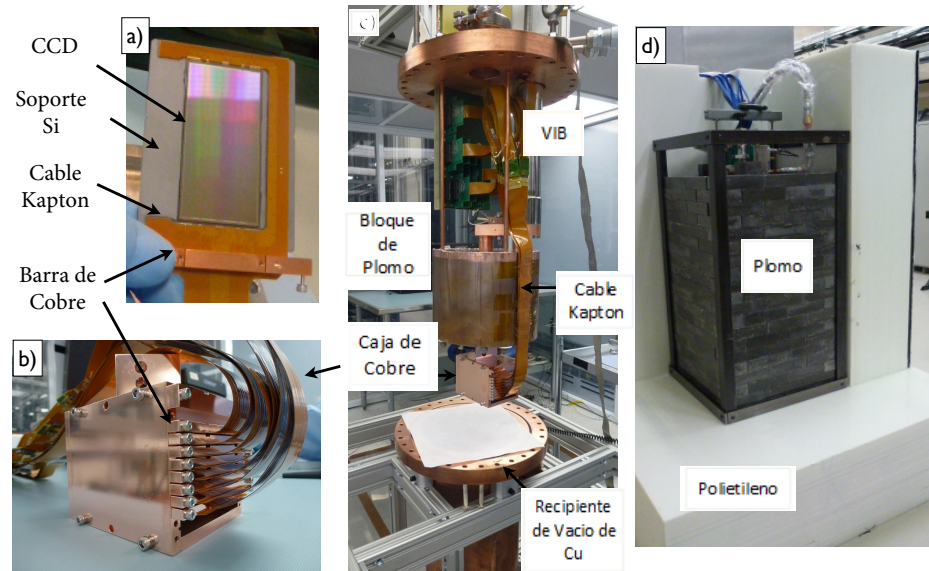


Figura 3.2 a) Un CCD DAMIC empaquetado. b) La caja de cobre que aloja los CCD. c) Componentes listos para insertarse en el recipiente de vacío. d) El recipiente dentro de la caja de plomo, durante la instalación del escudo de polietileno.
Fuente: [8,9]

3.2. El experimento CONNIE (*Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment*)

El experimento CONNIE utiliza CCDs de alta resistividad completamente empobrecidos como detectores de partículas en un intento de medir por primera vez la dispersión elástica coherente neutrino-núcleo entre los antineutrinos generados en un reactor nuclear con los núcleos de los átomos de Silicio que conforman el CCD. Los detectores de CCD son exactamente los mismos que los utilizados por el experimento DAMIC, pero la diferencia consiste en que el sistema de detección tiene que estar lo mas cerca posible a un reactor nuclear. Esto implica que los detectores estarán expuestos a un flujo mayor de partículas provenientes de los rayos cósmicos y de la radioactividad natural al no poder estar bajo tierra como en el caso de los experimentos situados en minas subterráneas. En el ultimo caso, la principal fuente de contaminación la dan los muones que son creados en la parte superior de la atmósfera y que llegan a la superficie terrestre.

Los CCDs se apilan en una caja de cobre de alta pureza, como muestra la Figura 3.3(a), éstos se mantienen a una temperatura de $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro de un recipiente de vacío a 10^{-7} mbar. Un cilindro de plomo de 15 cm de longitud dentro del recipiente protege a la matriz con los CCDs de las partículas gammas que hayan sido generados en las interacciones de los muones con el castillo de plomo, y también de la radiación procedente de contaminantes radiactivos que puedan existir en los componentes de la electrónica de lectura. El escudo de radiación esta conformado por dos fases:

- Fase I consistente en una capa interna de 30 cm de polietileno (para frenar a los neutrones que puedan ser generados por las interacciones de los muones con las paredes de plomo), seguida de 5 cm de plomo de alta pureza.
- Fase II consistente en 10 cm adicionales de plomo (totalizando así 15 cm de Pb) y una capa externa de 30 cm de polietileno.

El concepto del escudo completo se muestra en la Figura 3.3(b). En la Figura 3.3(c) se muestra una imagen del interior del contenedor con la instalación final del detector, la electrónica y los sistemas de soporte [10].

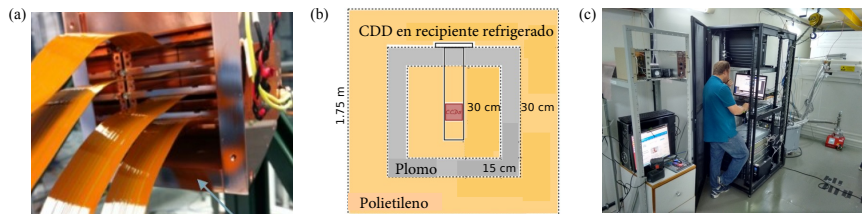


Figura 3.3 (a) Caja de cobre CCD. (b) Concepto de escudo completo. (c) Instalación completa dentro del contenedor en las inmediaciones del reactor nuclear Angra II.

Fuente: [10]

3.3. Procesamiento de las imágenes

Ambos experimentos usan las mismas herramientas para el análisis de las imágenes provenientes de los CCDs. Estas son conocidas como los DAMIC Tools y consisten en una cadena de procesamiento compuesta por seis pasos específicos, de los cuales los cinco primeros tienen la misión de preparar la imagen para el último paso que será el encargado de hacer el reconocimiento y la extracción de los eventos o comúnmente llamados *hits* de la imagen. Cada uno de los pasos se describen a continuación.

1. Cálculo y sustracción del *overscan*: este paso se encarga de calcular el nivel medio de cada línea en la zona de *overscan*. Esta zona, como fue explicada anteriormente en la sección 2.5, es una zona en donde no hay pixeles reales, sólo se generan las señales necesarias y se hace una lectura ficticia para determinar el *offset* y ruido introducido por la electrónica de lectura en la imagen final. Una vez completado este paso se eliminan las zonas de *overscan*. En la Figura 3.4 se ilustra este paso.

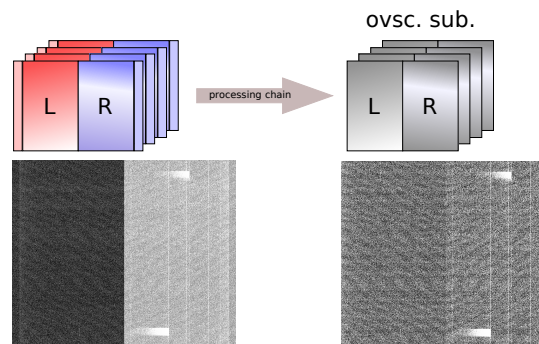


Figura 3.4 Proceso de sustracción del *overscan*. En la imagen de la izquierda se observa la zona de *overscan* como una región de pixeles mas oscuros hacia el lado derecho de la imagen. Una vez hecha la sustracción, esta zona es recortada como se muestra en la imagen de la derecha.

Fuente: [11]

2. Calculo de master BIAS: este paso usa varias imágenes para generar una imagen maestra para la eliminación del BIAS. A esta imagen maestra se la conoce como master BIAS. En la Figura 3.5 se ilustra este paso.
3. Sustracción del master BIAS: en este paso se sustrae el master BIAS de cada una de las imágenes a analizar. De esta manera se eliminan las desviaciones individuales pixel a pixel del *offset*. Este proceso se ilustra en la Figura 3.6.
4. Sustracción de ruido correlacionado: minimiza la varianza de cada imagen usando la información grabada por el amplificador izquierdo (el que sólo registra el ruido). Como se mostró en el capítulo 2, un CCD puede estar dividido en secciones para una mayor velocidad de lectura de la imagen, donde cada sección tiene su propio amplificador de salida. En los experimentos CONNIE y DAMIC se hace una lectura falsa de uno de los amplificadores de salida, es decir solo se va midiendo la salida del amplificador sin que en realidad se estén midiendo cargas del CCD mientras el

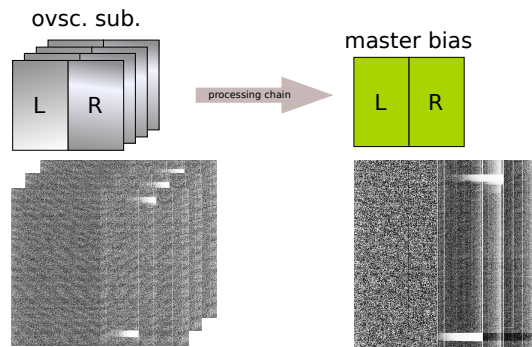


Figura 3.5 Proceso de calculo de master BIAS. Se usan varias imágenes para calcular una única imagen que permite eliminar o minimizar al máximo el las variaciones individuales pixel-pixel del *offset*.

Fuente: [11]

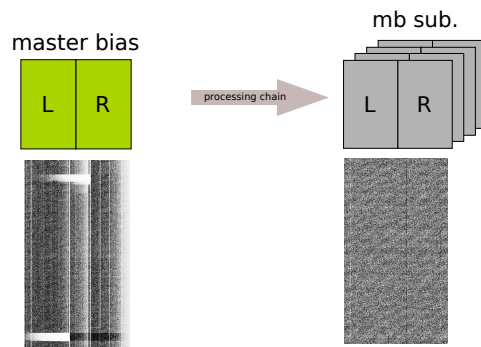


Figura 3.6 Sustracción del master BIAS. Se sustrae numéricamente el master BIAS de cada una de las imagenes a ser analizadas.

Fuente: [11]

otro amplificador del lado derecho si está se esta usando de forma normal midiendo cargas. Lo que se hace es medir el ruido de forma simétrica pixel a pixel para poder, mediante un procesamiento, disminuir al máximo el ruido correlacionado en tiempo de la imagen. En la Figura 3.7. se muestra una imagen tomada con su “espejo de ruido”.

5. Preparación de máscara: En este paso se crea una imagen monocromática de la misma resolución que las imágenes a ser analizadas donde se marcan los pixeles inválidos. Se pueden identificar estos pixeles analizando en cada imagen aquellos pixeles que permanecen saturados o con valor constante. Esta imagen de mascara se usará en el

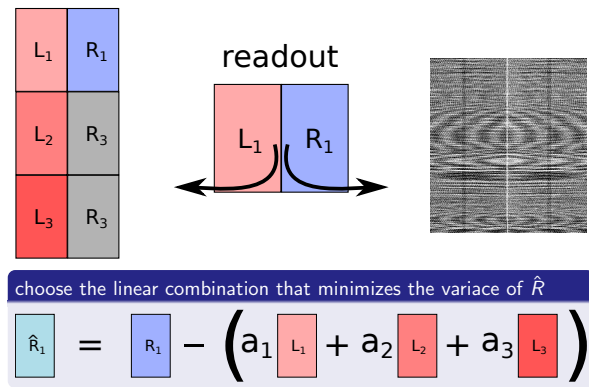


Figura 3.7 Sustracción de ruido correlacionado. Se utilizan los espejos de ruido de la imagen actual y las dos imágenes siguientes para hacer un combinación ponderada y luego se sustrae esta del lado real de la imagen. Los pesos de las ponderaciones son calculados para minimizar la varianza de la imagen. Luego de este paso se la zona del espejo de ruido de la imagen.
Fuente: [11]

último paso para que se puedan establecer criterios a la hora del análisis. Por ejemplo, no tener en cuenta eventos o *hits* con mas de un pixel invalido.

6. Extracción de eventos: al llegar a este paso las imágenes están corregidas, es decir, el ruido, el *offset* y el BIAS están disminuidos al máximo. Las imágenes son analizadas para hacer un catalogo de eventos donde se guarde toda la información de las interacciones con partículas registradas por el CCD para un análisis *offline* posterior. En la Figura 3.8 se muestra una imagen típica tomada por un CCD donde se marcan los tipos de *hits* según la partícula interactuante. Nótese también en la figura que aparecen en la imagen eventos de bajas energías (llamados también de eventos con difusión limitada compuesta generalmente por pocos pixeles), que, según la teoría, podría tratarse de un evento de materia oscura, o también de un evento coherente de neutrino, dependiendo por supuesto, de qué experimento se esté analizando.

Incluso cuando la imagen ya ha sido mejorada puede ocurrir que un grupo de pixeles afectados por ruido se detecte como un evento, por lo que el software tiene ciertos parámetros configurables como umbrales de detección, tamaño mínimo de eventos, energía mínima, etc., que reduce la probabilidad de una detección falsa. Otro de los parámetros importantes es el valor de calibración, que hace que el valor numérico de un pixel se corresponda con una cantidad de energía en la etapa de análisis.

En la Figura 3.9 se muestra como como se define el umbral de detección con respecto a al nivel de ruido de la imagen. Nótese que con un ruido blanco gaussiano de media

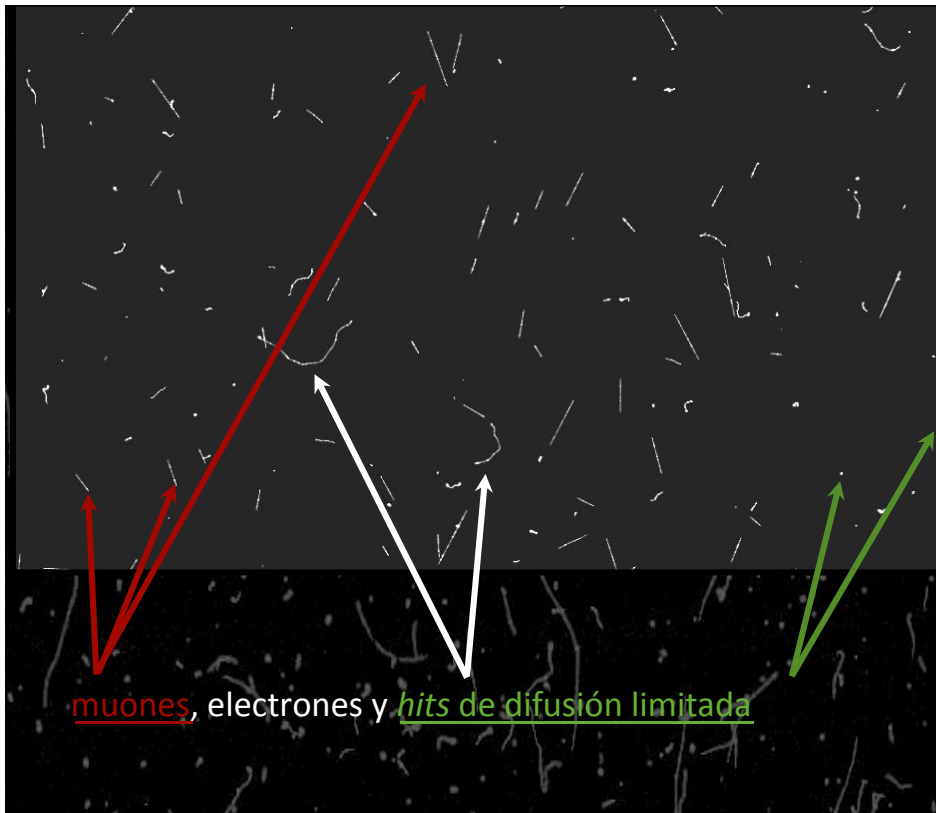


Figura 3.8 Se observan los distintos tipos de *hits* cuya forma, tamaño e intensidad depende de la partícula que interactuó con la masa del CCD en esa zona.

Fuente: [7]

cero, si se escoge un umbral de detección de valor cuatro veces el valor cuadrático medio del ruido, la probabilidad de detectar erróneamente un interacción por ruido como evento es casi nula.

Los eventos obtenidos son guardados en un catálogo donde para cada evento se guardan varios parámetros como por ejemplo la posición de pixeles que componen el evento, la energía de cada pixel, el centro geométrico, abscisa máxima y mínima, ordenada máxima y mínima, etc. El contenedor elegido es el un archivo tipo TREE del ROOT *Data Analysis Framework* [12]. Este es un sistema de software científico modular que proporciona todas las funcionalidades necesarias para tratar el procesamiento de big data, el análisis estadístico, la visualización y el almacenamiento. Está escrito principalmente en C++ pero integrado con otros lenguajes como Python y R.

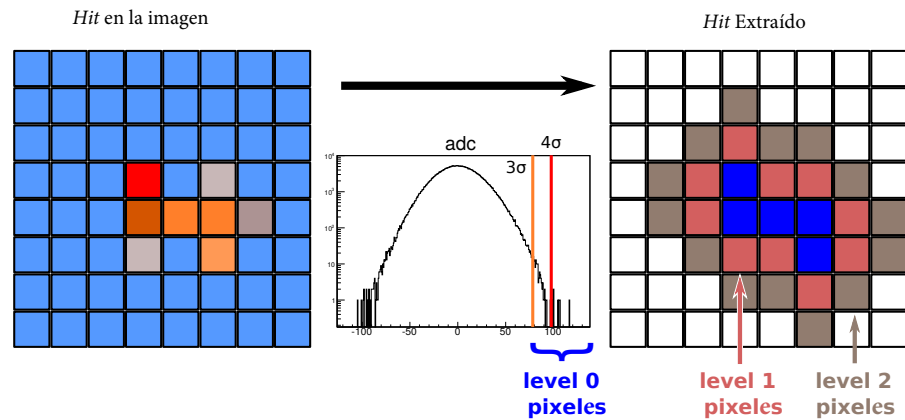


Figura 3.9 Extracción de un *hit* de una imagen de CCD. Se muestra como se definen los umbrales de detección con respecto a la distribución del ruido gaussiano (σ es el valor cuadrático medio de ruido). Los píxeles cuyo valores superen 4 veces el valor cuadrático medio del ruido están en el nivel cero. Esto significa de que la probabilidad de que hayan alcanzado esos valores por causa del ruido es casi nula.

Fuente: [11]

El análisis físico viene después de la extracción de los eventos. Un análisis típico por ejemplo sería hacer un histograma de los eventos de todas las imágenes según la cantidad de energía después de la selección de ciertos eventos (o cortes) de acuerdo a las consideraciones físicas del problema. La Figura 3.10 muestra un espectro en energía de los eventos tomados por un CCD del experimento CONNIE. Este espectro se forma básicamente haciendo un histograma de la cantidad de eventos según su nivel de energía (suma de valores de los píxeles que lo componen)

3.3.1. Calibración del CCD

Un espectro de energía de una fuente conocida puede utilizarse para la calibración del detector. Por ejemplo, para encontrar un factor de ganancia que al multiplicar por toda la imagen haga que los picos en el espectro de energía coincidan con lo que se espera para esa fuente. La Figura 3.10(a) muestra el espectro obtenido utilizando una fuente radiactiva de ^{55}Fe como patrón. Los distintos picos muestran los rayos X provenientes de elementos de referencia colocados frente al CCD para poder medir sus rayos X característicos. La Figura 3.10(b) muestra los valores en energía medidos para cada uno de los picos estudiados en función a la energía de referencia. Se puede observar una correlación lineal perfecta hasta 60 keV de energía. Después de esta calibración del CCD y sistema de lectura

se puede hacer una correspondencia entre el valor numérico de un pixel y la cantidad de energía en eV para ese valor.

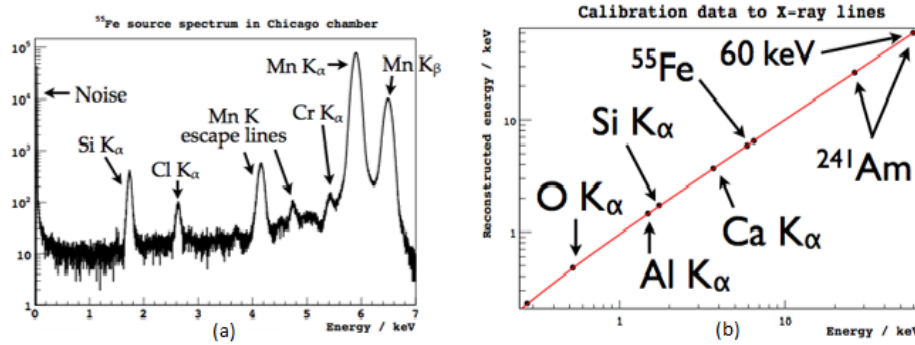


Figura 3.10 (a) Espectro capturado por un CCD cuando una fuente calibrada de rayos X de ^{55}Fe es colocada en frente. También se colocan materiales con otros elementos utilizados como referencia, para que los rayos X del ^{55}Fe generen los rayos X característicos de cada uno de esos elementos. (b) Correlación entre las energías medida por el CCD para cada elemento con las energías características de los elementos utilizados como muestra.

Fuente: [8]

3.4. El dispositivo de adquisicion actual de DAMIC y CONNIE

Ambos experimentos usan el sistema de código abierto Monsoon para adquirir las imagenes de los detectores CCDs. El Monsoon fue un esfuerzo de desarrollo del NOAO (*National Optical Astronomical Observatory* por sus siglas en ingles) que es un código abierto utilizado para abordar la necesidad de adquisición de imágenes limitada a detectores para toda la comunidad astronómica [13].

El Monsoon se basa en una pila de capas que están separadas por documentos de Control de Interfaz Concisos (ICD). Este modelo arquitectónico permite un alto grado de uniformidad entre los sistemas que soportan los requerimientos de las diferentes tecnologías de detectores [13].

3.4.1. Hardware

La arquitectura se manifiesta físicamente en cuatro módulos electrónicos que cuentan con el nucleo (core) y *suites* de software. Los cuatro módulos electrónicos son:

- Placa de control maestra (MCB) - controles comunicación con el nodo de adquisición de píxeles (PAN), control de bus DHE y detector secuenciación de reloj.

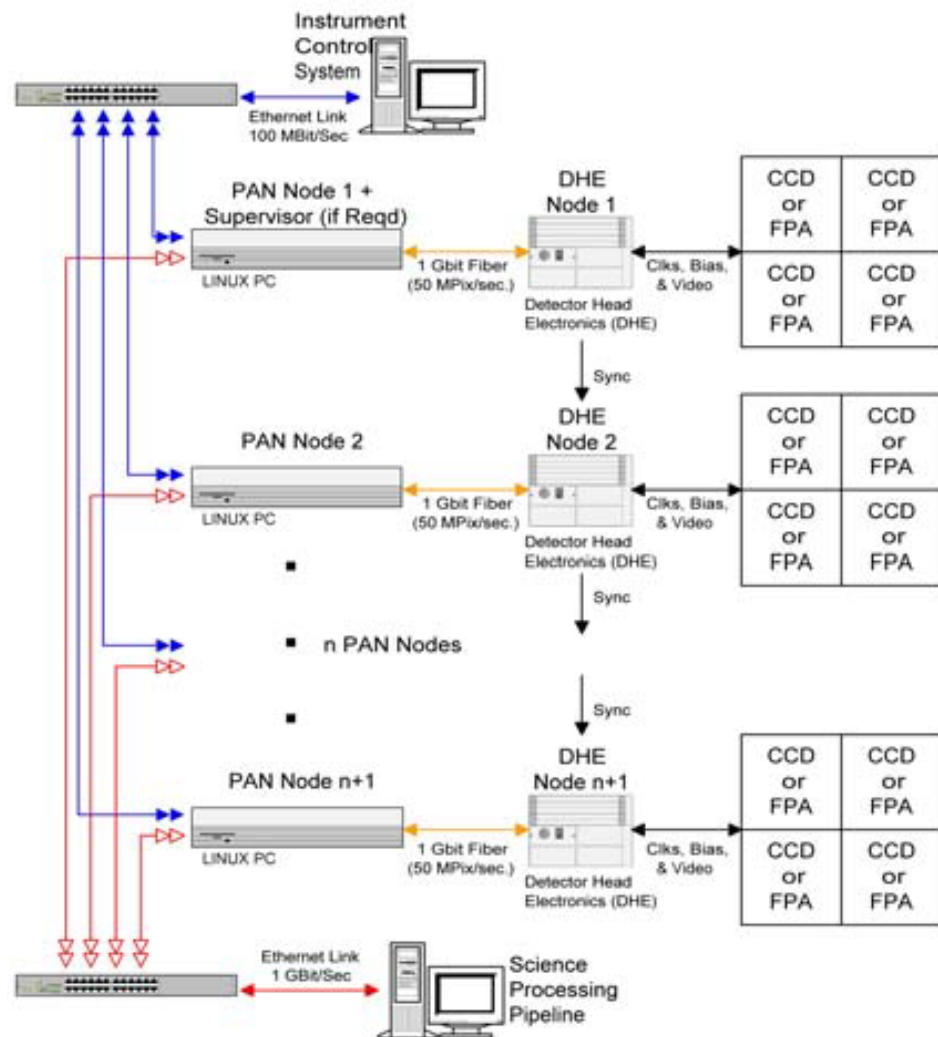


Figura 3.11 Ejemplo de aplicación genérica con arquitectura completa del Monsoon en un sistema de adquisición para múltiples CCDs.

Fuente: [13]

- Reloj y placa de polarización (CLK) - produce baja sesgos de voltaje y señales de reloj.
- Junta de Adquisición de IR (IRACQ) - adquiere hasta 36 canales de señal de vídeo acoplada a CC.

- CCD Acquisition Board (CCDACQ) - condiciones y adquiere hasta 8 canales de AC acoplados vídeo y proporciona sesgos de alto voltaje.

3.4.2. Software

Todas las funciones de control del sistema se realizan por la suite de software PAN. La capa de software, llamado el Servidor de Pixel Genérico (GPX) y escrito en lenguaje C, maneja las tareas de configuración del sistema, las comunicaciones del cliente, la adquisición de datos de píxeles, el procesamiento de adquisiciones y la transferencia de datos de los píxeles. Para los planos focales grandes donde más de un nodo DHE se requiere una tarea de supervisor actúa como coordinador y comando / mensaje distribuidor. En todos los casos la aplicación cliente, normalmente el Sistema de Control de Instrumentos (ICS). Todas funciones y parámetros del sistema son asignados a los pares nombre / valor de atributo durante un proceso de configuración inicial. Los atributos definidos se manipulan para establecer y optimizar los parámetros del sistema para diferentes detectores y/o modos operativos alternativos. De esta forma sólo es necesario modificar un módulo de biblioteca del software [13].

3.5. El futuro sistema de adquisición para DAMIC y CONNIE

El Fermi National Accelerator Laboratory en conjunto con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de asunción, la Universidad de Bahía Blanca y la Universidad Autónoma de México están desarrollando un nuevo hardware de adquisición que podrá ser utilizados en los experimentos CONNIE, DAMIC y cualquier otro en donde se utilicen CCDs.

La idea es producir una sola tarjeta que pueda controlar absolutamente todo lo relacionado a la lectura de varios CCDs en forma simultánea, y también que ofrezca la suficiente flexibilidad para adaptarse a los distintos parámetros de lectura de cada CCD por separado. El hardware propuesto pretende utilizar como software de control y adquisición al OTS DAQ (*Over the shell Data Acquisition*) desarrollado en el mismo Fermilab. El OTS DAQ es una arquitectura de adquisición de datos de bajo costo como servicio, basada en tecnología de IoT ((Internet of things por sus siglas en Ingles)) comercial que es escalable desde unos pocos MBytes/seg, hasta cientos de GBytes/seg.

3.5.1. El OTS DAQ

La parte del software de este nuevo sistema es cubierto por OTS DAQ. En la Figura 3.12 se puede observar un esquema de la implementación del sistema OTS en un experimento. El OTS DAQ implementa una arquitectura cliente-servidor. Unas maquinas se pueden conectar directamente al hardware Fron-End que es el que interactúa directamente con dispositivos de medición o control y se comunican por medio de interfaces giga ethernet estándares. El software ofrece funciones de base de datos para parámetros, control de versión, una maquina de estado de software para que el usuario pueda adaptar el software para realizar las funciones que necesita y puede ser accesible vía web a través de la red. El software es open source y se provee con una interfaz de *firmware*. De forma que la implementación soluciona inmediatamente las necesidades de comunicación entre el Front-end y el software. Es decir que casi a cualquier sistema de adquisición que funcione a base de FPGA se le puede integrar el firmware o Ethernet Off-the-Shelf (OEI) para que funciones con el OTS DAQ. Luego se usan las funciones de adquisición de datos del software según las necesidades del experimento [14].

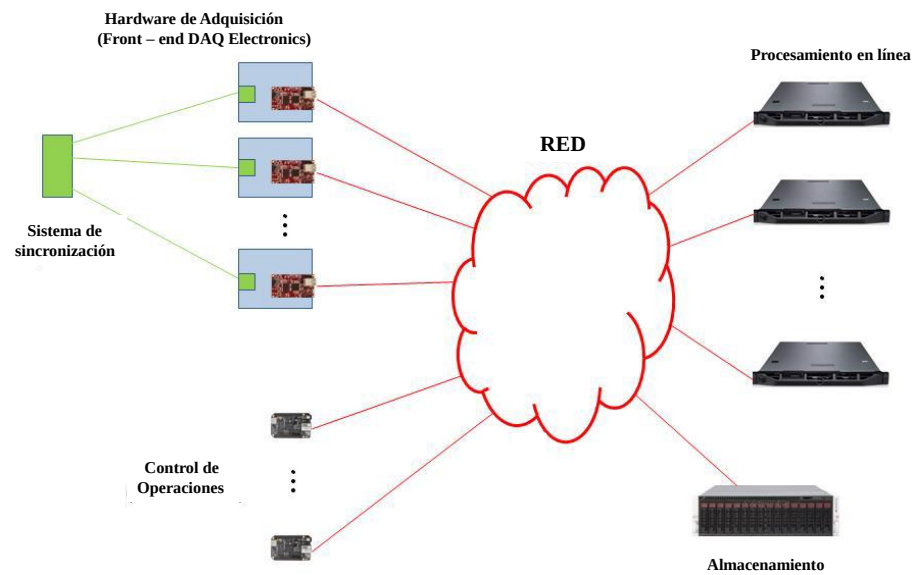


Figura 3.12 Ejemplo de aplicación genérica del OTS DAQ en un sistema de adquisición utilizando una red IP para control, transferencia de datos, monitoreo y análisis usando interfaces web multiplataforma.

Fuente: [14]

La interfaz Ethernet Off-the-Shelf (OEI) mostrada en la Figura 3.13 es la solución Ethernet de firmware FPGA para el proyecto de adquisición de datos Off-the-Shelf (OtS). El bloque de firmware OEI proporciona a la lógica de usuario una interfaz simplificada a una interfaz de capa física GMII (modo de 8 bits), MII (modo de 4 bits) o RGMII (modo de DDR de 4 bits). El OEI se diseñó de tal forma que solo se pueden enviar y recibir paquetes de datagramas de usuario (UDP). Esto se presta a la simplicidad de la OEI. Esto también coloca la carga de la verificación de orden de paquete y la retransmisión en la capa de aplicación del usuario [14].

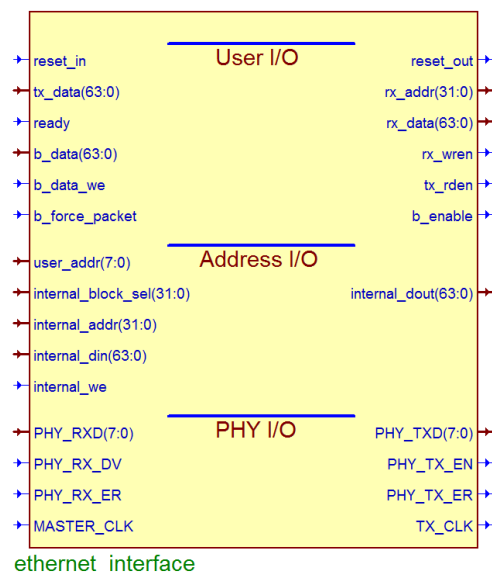


Figura 3.13 Interfaz Ethernet Off-the-Shelf. Es un módulo de firmware que permite que el firmware personalizado del sistema de adquisición se comunique con el servidor del OTS DAQ de forma transparente via puerto ethernet.

Fuente: [14]

En la Figura 3.12 se muestra una posible aplicación de OTS DAQ utilizando una red IP para control de las tarjetas de adquisición, transferencia de datos, monitoreo y análisis basados en interfaz web independiente de los sistemas operativos o plataformas escogidas.

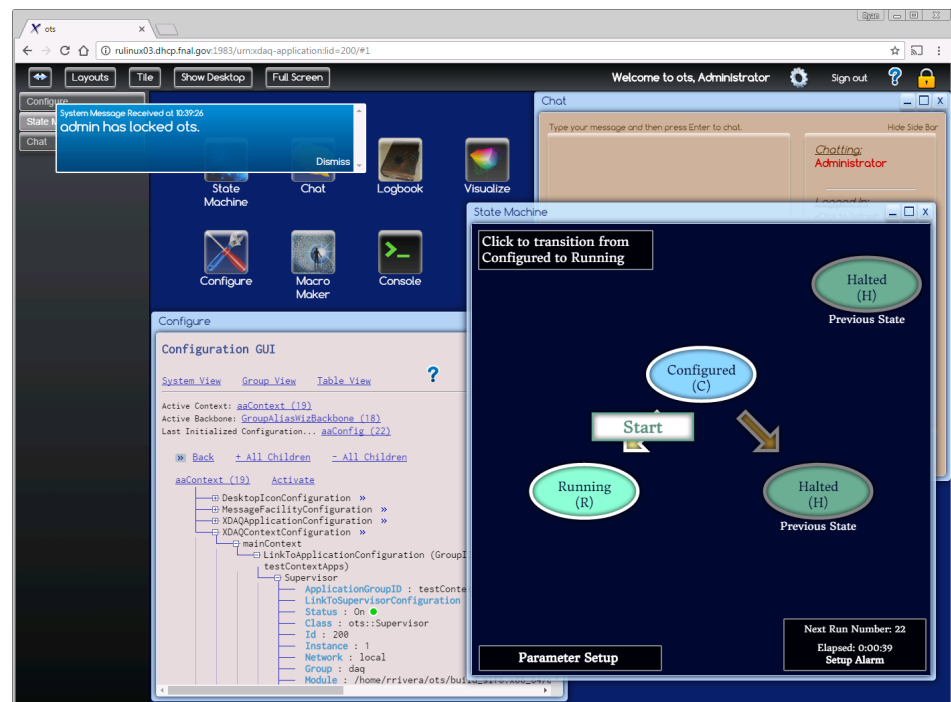


Figura 3.14 Interfaz web del OTS DAQ. Se puede observar la representación gráfica de la maquina de estado de software y la ventana de configuración.
Fuente: [14]

3.5.2. Hardware de adquisición de imágenes

Desde el punto de vista del hardware, la necesidad de contar con mayor flexibilidad para agregar nuevas opciones de procesamiento o patrones de lecturas para los CCDs impulsó el desarrollo de un nuevo sistema de adquisición. También existe la necesidad de desarrollar la base para el futuro sistema de adquisición de datos que pueda manejar por lo menos 22 CCDs en paralelo. Se busca que esta nueva tarjeta de adquisición sea de bajo costo aprovechando los avances en componentes electrónicos. Este nuevo hardware se encuentra en etapa de pruebas y muy pronto empezará a adquirir imágenes utilizando los mismos CCDs que se emplean en los experimentos CONNIE y DAMIC La tarjeta en desarrollo es capaz de crear la señales necesarias para transferir las cargas como se mostraron anteriormente en el apartado 2.3. Este hardware permite generar cualquier patrón de pulsos con una resolución de 8 ns, además de la señales de control del amplificador de salida. También es posible digitalizar cuatro canales en simultaneo a una frecuencia de 15 Mhz y 18 bits de resolución. Se brindan opciones de telemetría para monitorear todas las señales

de relojes, señales de video y BIAS, cuya tensión también sera configurable. De esta forma sera posible adaptar y optimizar el hardware a varios tipos de CCDs. Para unidad de control de la unidad y cálculos embebidos se utiliza un FPGA Xilinx Kintex 7 con un DSP integrado. El firmware cargado a la FPGA también esta encargado de la generación de relojes y comunicación con el software OTS DAQ. El hecho de que la unidad de adquisición este basado en firmware brinda al sistema una flexibilidad extra, aunque se intentara en lo posible de brindar esta flexibilidad sin la necesidad de modificación del firmware de forma frecuente.

En la Figura 3.15 se muestra un esquemático del hardware de adquisición. Este dispositivo permite el envío en simultaneo de 4 canales pre-procesados, es decir, calculando el valor de cada pixel con el método que el usuario elija, y ademas el envío de las señales sin procesar de hasta dos canales en simultaneo. No es posible enviar todos los 4 canales pre-procesados y todos los sin procesar (RAW) por la restricción que impone la conexión gigahethernet. Las especificaciones técnicas mas importantes se muestran a continuación:

- Digitalizacion a 15 MS/s (Mega samples per seconds) y 18 bits de resolución.
- Cuatro canales en simultaneo con procesamiento y calculo de pixel por hardware configurable.
- Envío en simultaneo de hasta dos canales en modoRAW.
- Secuenciador (generador de patrones de tensiones para las fases del CCD) completamente configurable con resolucion de 8 ns y rango de tensiones entre -6.6 V a 13.6 V .
- Comunicación vía puerto Gigahethernet estándar.
- BIAS configurables de forma digital para polarización de detectores.
- Telemetría para monitoreo de todas las señales del secuenciador, video y BIAS.

3.5.3. Señales de video sin procesar (RAW)

Durante el proceso de desarrollo del sistema de adquisición, calibración del hardware y caracterización del ruido es necesario estudiar la señal de video proveniente directamente de los sensores CCDs. También podría ser necesario reconstruir la imagen a partir de la señal sin procesar para analizar el desempeño de las herramientas de análisis ante algún cambio o filtrado de pre-procesamiento.

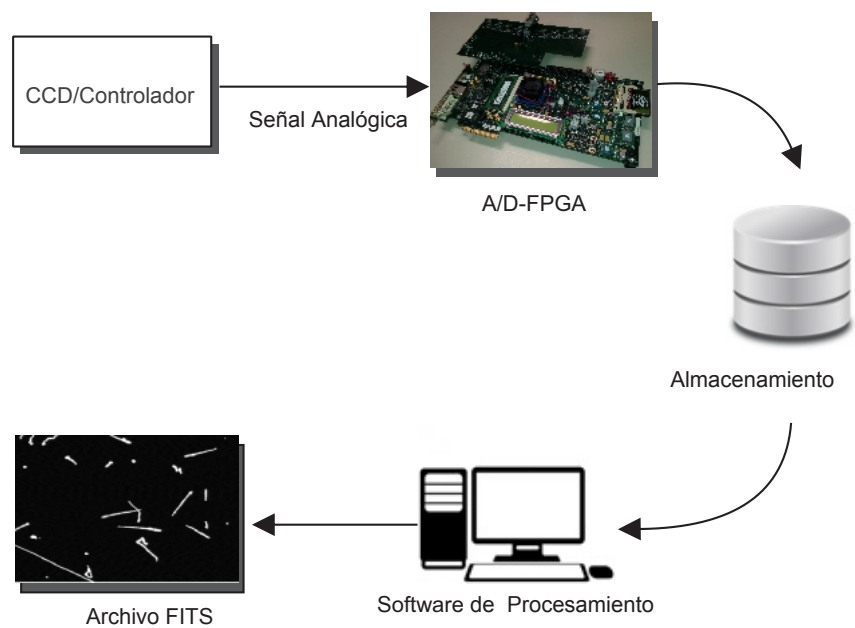


Figura 3.16 Esquema del método usado hasta ahora para obtener las señales sin procesar (RAW). Se hace una derivación de la señal analógica para digitalizarla externamente. El software que se muestra es la propuesta de este trabajo.

Fuente: Elaboración Propia

Actualmente se han hecho algunos de estos análisis de la señal haciendo una derivación de la señal de video desde el sistema Monsoon y digitalizandola externamente con un ADC de alta velocidad controlado por un FPGA para su posterior transmisión a una PC para su almacenamiento. El programa de interfaz fue escrito con Matlab. En la Figura 3.16 se muestra el esquema del método usado hasta ahora para obtener las señales sin procesar.

El nuevo hardware de adquisición es capaz de enviar las señales *RAW* (sin hacer el procesamiento y cálculo de píxeles) de forma nativa, es decir, sin necesidad de derivar la salida del CCD y usar un convertidor analógico a digital externo. De esta forma la misma señal digital usada para calcular los píxeles es enviada vía puerto ethernet para permitir el estudio de la señal o el desarrollo de alguna optimización para el hardware en sí. Además el hecho de que la señal obtenida sea una copia fiel de la señal utilizada para el procesamiento embebido brinda confiabilidad a los estudios. Lo único necesario a partir de este punto fue un software que permita la reconstrucción de la imagen partir de la señal *RAW* almacenada y que brinde la posibilidad de aplicar métodos de cálculo de pixel diferentes o la posibilidad de agregar filtros o incluso para ver como afecta a la imagen final y su análisis a través de las herramientas. El software propuesto en este trabajo busca cubrir ésta necesidad y será descrito en detalle en el siguiente capítulo.

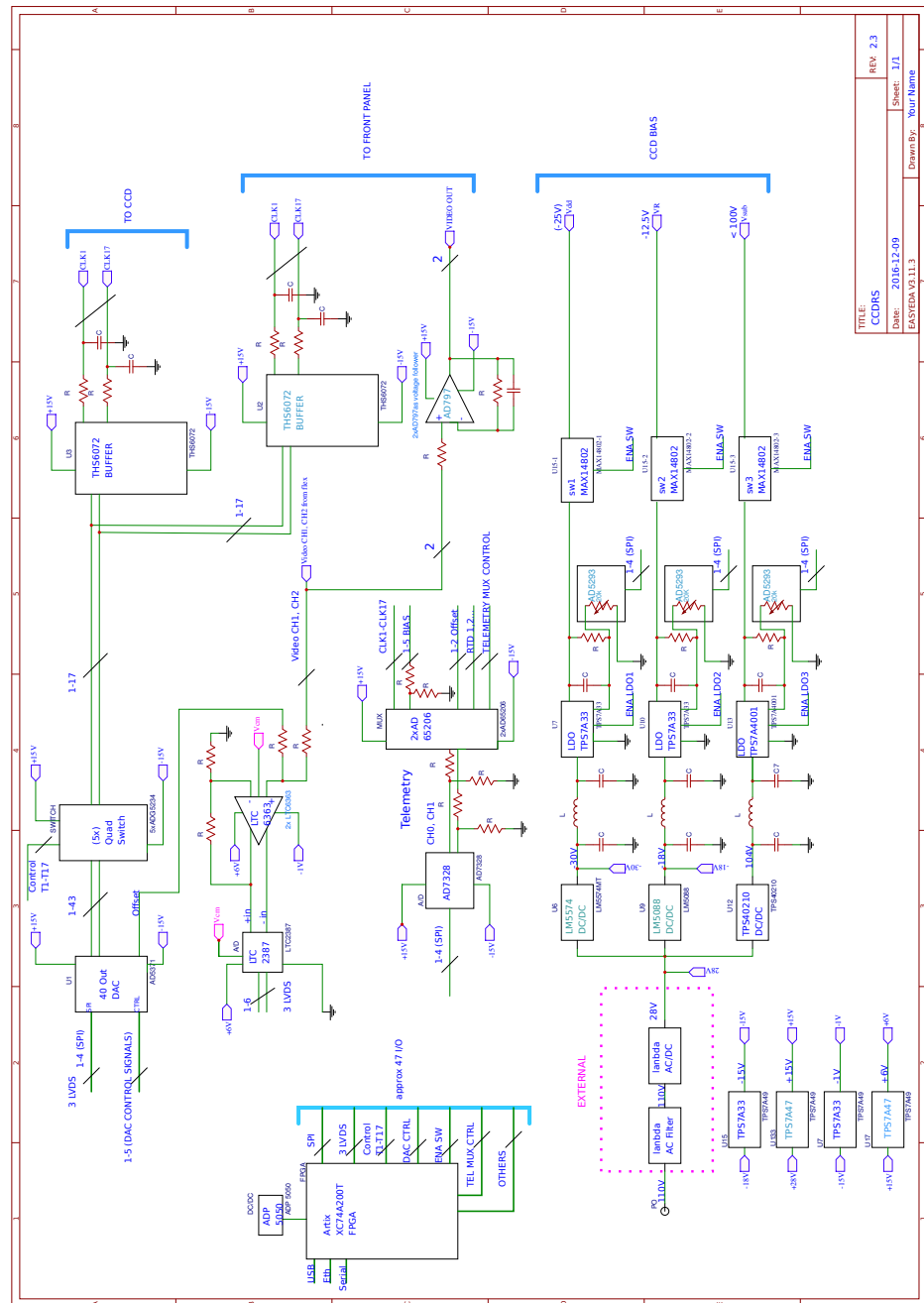


Figura 3.15 Diagrama esquemático del prototipo de sistema de adquisición.

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 4

SOFTWARE DE RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES

Este capítulo se centra en la descripción detallada de los procesos y métodos llevados a cabo para generar una imagen a partir de la señal digitalizada de un detector CCD y brindar herramientas de desarrollo. El software fue escrito completamente en código C++ y macros del ROOT *Data Analysis Framework*. Se hará una descripción funcional de los métodos utilizados sin entrar en detalles sobre el código en si, así como una descripción detallada de la señal de producida a la salida de un detector CCD.

4.1. Descripción detallada de partes de la señales de video

Para convertir la señal producida al transferir y medir cargas desde un detector CCD es necesario identificar partes específicas de la señal de forma a saber donde están las muestras que serán usadas para calcular el valor de un pixel y para saber qué parte de la imagen se esta procesando en el momento. Por ejemplo saber cuando una fila completa ha terminado o cuando ya no hay mas datos que procesar. Si se gráfica la señal digitalizada con respecto al tiempo son claramente reconocibles visualmente las partes que marcan

estos eventos. Las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 muestran los diferentes eventos reconocibles en una típica señal de salida de un CCD; en estas pueden observarse las siguientes características:

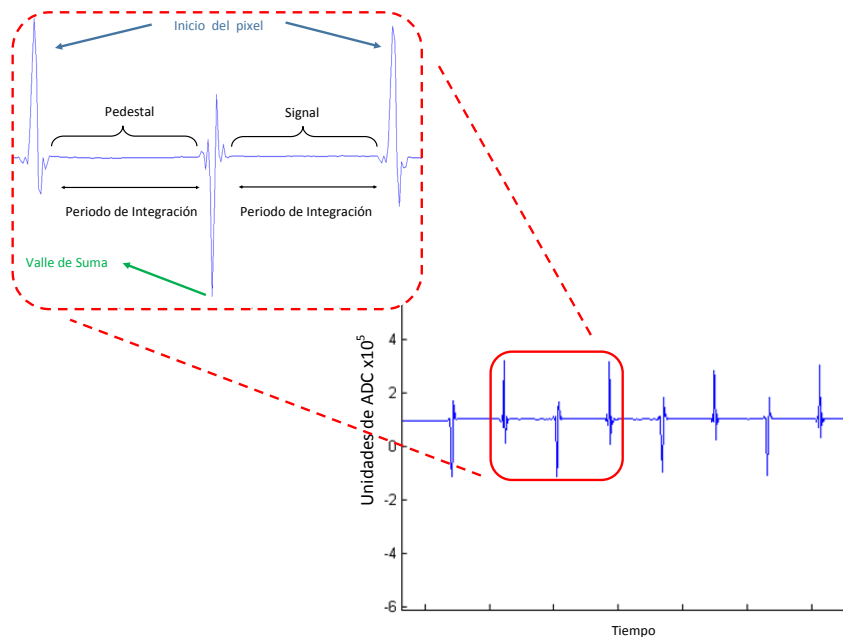


Figura 4.1 Se muestran los eventos en un pixel amplificado de una señal real. Estos eventos son el Inicio de Pixel (IDT), Valle de Suma (VS), tramos de pedestal, tramo de reset y de pedestal.

Fuente: Elaboración Propia

1. Inicio de Imagen (IDI): Puede que la señal se empiece a digitalizar antes de que se inicie la lectura del CCD propiamente, por lo que parte del contenido de esa señal guardada será solamente ruido, el inicio de la imagen estará marcado por el primer pico producido por la señal de reset o inicio de pixel.
2. Inicio de Pixel (IDP): Se trata de un pico que se produce al enviar el pulso de reset al circuito de transferencia de carga descrito en el capítulo 2. Este pico es seguido por el pedestal y marca el inicio de un nuevo pixel.
3. Tramo de Pedestal: Lo conforman las muestras que corresponden al nivel de pedestal. Como se vio en el capítulo 2, esta parte de la señal se produce cuando el capacitor de lectura se conecta la tensión de referencia.

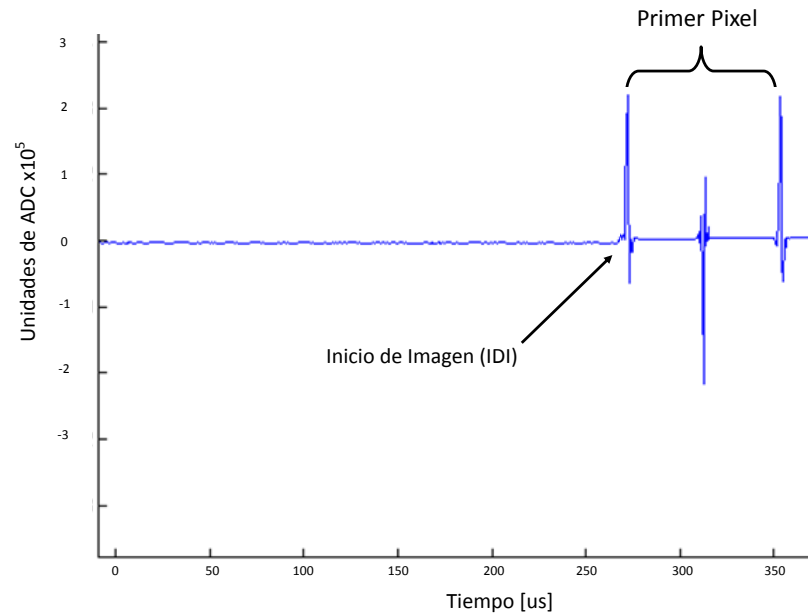


Figura 4.2 Se muestra el momento en que se empieza a transferir cargas desde el CCD. Este evento marca el inicio de imagen (IDI).

Fuente: Elaboración Propia

4. Valle de Suma (VS) : Se trata de un pico que se produce al enviar el pulso que inicia la transferencia de cargas hasta el capacitor de lectura.
5. Tramo de Signal: Lo conforman las muestras que siguen al valle de suma hasta antes del siguiente Inicio de Pixel (IDP). Como se mostró en el capítulo 2, esta parte de la señal se produce cuando el capacitor de lectura se conecta al amplificador de salida del CCD. En este momento se transfieren las cargas al capacitor que ya estaba cargado al nivel de pedestal, por lo que la diferencia entre el nivel de pedestal y el nivel *signal* será proporcional a la carga del pixel medido en el momento. Idealmente, tanto el nivel de pedestal como el nivel de señal deberían ser constantes, y para obtener el valor de la carga de pixel (amplificado por algún factor conocido) se podría conocer simplemente haciendo la diferencia entre ambos. Sin embargo, en un sistema de adquisición real la señal está afectada por fluctuaciones producidas por diferentes fuentes, por lo que en un cálculo de valor de pixel que utiliza el doble muestreo correlacionado simple se hace el promedio de los dos niveles por un tiempo determinado antes de calcular la diferencia.

6. Fin de línea (FDL): Se trata de un pico o un conjunto de picos de amplitud mucho mayor que los demás que marcan el fin de una línea en la imagen. En este caso, un nuevo pixel comienza inmediatamente después de un fin de línea.
7. Fin de Imagen (FDI): El último fin de línea marca el fin de la imagen. Este distingue de los demás FDLs porque inmediatamente después sólo se puede observar ruido y no el primer pixel de la siguiente línea.

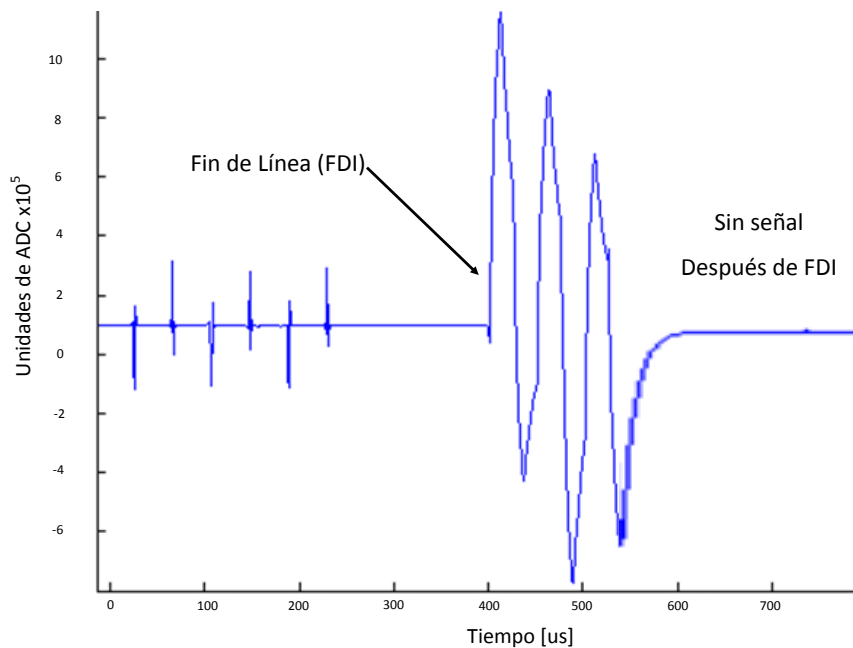


Figura 4.3 Se observa la forma de un Fin de línea (FDL).

Fuente: Elaboración Propia

8. Ventana de Integración (IW por sus siglas en ingles): Es el periodo de tiempo en que se mantiene el nivel de *signal* o pedestal. Normalmente ambos tienen la misma duración y se hace referencia a ellos como el tiempo de integración. Desde un punto de vista más técnico, estos son los periodos durante los cuales se mantiene conectado el capacitor de lectura a la entrada del amplificador, con una tensión de referencia para el caso del pedestal, mientras que en el caso de la señal, el capacitor de lectura está con la tensión producida después de transferir la carga del pixel al mismo. Aunque son intervalos de tiempo, desde el punto de vista del software, estos se representan en cantidad de muestras en la señal digitalizada.

9. Guarda de transitorios (GT): Es el periodo de tiempo (en numero de muestras) que tardan los niveles de pedestal o de *signal* en estabilizarse después de un pico de IDP o VS respectivamente.

De esto se desprende que si de alguna forma fuera posible identificar esas partes en una señal de salida del CCD y tomar las partes útiles sería posible reconstruir la imagen completa.

La señal digitalizada se almacena en archivos. Para facilitar la manipulación de los mismos, no se guarda la señal completa de una imagen en un solo archivo. En su lugar se guardan pequeñas porciones en archivos de 16 MB aproximadamente. Se pueden usar técnicas de multiplexación para almacenar señales de mas de un canal en el mismo archivo, como en el caso que trata este trabajo en el que se multiplexan dos canales. Es importante recalcar que al hacer la división en pequeños archivos no se tiene en cuenta en qué parte de la señal se hace el corte. Este puede caer en medio de un pixel o recortar los picos de fin de línea por ejemplo. Esto debe ser anticipado por el software de modo que la división no afecte la reconstrucción completa de la imagen.

4.2. Interfaz del software

El usuario interactúa con el software a través de línea de comandos en el sistema operativo Linux. En la Figura 4.4 se muestra una captura del software en funcionamiento. El usuario simplemente debe llamar al ejecutable e indicar la ubicación de los archivos que corresponden a la señal digitalizada. Estos deben estar nombrados de forma que puedan ser ordenados de forma cronológica y no debe faltar ningún archivo.

Si se llama al software sin indicar un directorio, se mostrara la ayuda en pantalla. Si se proporciona un directorio invalido o sin archivos con extensión “dat”, se mostrará en pantalla un mensaje de error. En la Figura 4.5 se muestran estas salidas.

4.3. Flujo del software

Esta sección explica el funcionamiento del programa haciendo un análisis funcional y en la misma secuencia en que se ejecutan los algoritmos para posteriormente dar mas detalles de los procesos claves en las secciones que siguen.

El desarrollo del software para leer la imagen se basa en el estudio de la información proporcionada por la señal de salida digitalizada del CCD. Todo el proceso de extracción de una imagen se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Leer el archivo (n).


```

[lcchavez@cluster tesIMGdebug]$ ./convertFiles2.exe digital_image_24bitADC/
Will read the following files:
    digital_image_24bitADC/*.dat
The output will be saved in the file:
    digital_image_24bitADC/ImageFile.fits
Warning: Output file already exists. It will be overwritten!.

Detecting video parameters...
    digital_image_24bitADC/CCD_13_dut-01461266540-24790.dat... (No signal)
    digital_image_24bitADC/CCD_13_dut-01461266540-24791.dat... (No signal)
    digital_image_24bitADC/CCD_13_dut-01461266738-95720.dat... (Signal OK)

Processing...
|=====| 100%

Warning: It seems like there are missing files. Though the image have been
extracted, it may have corrupted lines or be incomplete. Please verify that
all the files of this image are in the input directory and how they are named.
They must be named in some way that the software can sort them chronologically

Image file summary:
#Axis  #Cols  #Rows  datatype
    2    4270  3663  FLOAT(32 bits)

```

Figura 4.4 Ejemplo de uso del software. Se llama al ejecutable y se indica el directorio en donde se encuentran los archivos de imagen. Estos tienen extensión “dat”.

Fuente: Elaboración Propia

2. Encontrar los picos de inicio de Pixel (IDP).
3. Calcular los píxeles para cada línea.
4. Guardar la matriz de imagen en un archivo.

En la practica, estos pasos son procesos que se repiten una determinada cantidad de veces hasta terminar la imagen. Se puede ampliar esta secuencia de pasos y dar mas detalles con la Figura 4.6 en donde se hace una descripción mas detallada de cómo se van ejecutando los algoritmos del software y que procesos realizan en cada paso. El número de pasos se detalla a la izquierda de la imagen desde arriba a abajo. Estos representan la secuencia de los pasos y serán detallados a continuación.

Al comienzo del proceso, las muestras ya están digitalizadas y almacenadas en unidades de disco, lo que significa que deben ser leídos en orden cronológico. Estas son nombradas con *strings* basados en la fecha y hora en que fueron capturadas de tal forma que el programa pueda usar esos nombres para configurar la secuencia correcta de lectura de archivos. En el primer paso el archivo es leído y cargado en memoria. Por lo general, varias líneas de una imagen se guardan en el mismo archivo. Esto depende de la resolución de la imagen, tasa de muestreo y resolución del convertidor A / D, por lo que entre 2 y

```
[cchavez@cluster tesIMGdebug]$ ./convertFiles2.exe
return code 1

This program produces a fits image from a digitized signal of a CCD.
It will process all the available files. If one file is missing, the
process will stop but fits file will be created with the lines read
up to that point.
=====

Usage:
  ./convertFiles2.exe <Input_dir>

For any problems or bugs contact Rodrigo Chavez <cchavez@fnal.gov>
=====

[cchavez@cluster tesIMGdebug]$ ./convertFiles2.exe /digital_image_24bitADC
Error reading input directory: /digital_image_24bitADC/
The directory doesn't exist or is empty!

[cchavez@cluster tesIMGdebug]$
```

Figura 4.5 Ayuda del programa. Esta es desplegada en pantalla si se llama al software sin argumentos. El segundo mensaje de error es desplegado debido a que se proporcionó un directorio invalido o que no contiene archivos con extensión “dat”.

Fuente: Elaboración Propia

10 líneas completas se pueden colocar en un archivo de 16 MB. Debido a la división en archivos, habrá líneas de la imagen con sus muestras distribuidas en archivos consecutivos que el software deberá reconocer para procesarlas como si fuera una sola línea.

En el segundo paso, el programa busca picos de inicio de pixel (IDP). Esto se hace seleccionando muestras que satisfacen dos condiciones: (se hablará mas sobre esta condición en las siguientes secciones, pero por ahora se definen como las condiciones que debe cumplir una muestra en la señal digital para ser considerada como un pico de inicio de pixel)

1. La condición de pico:

$$Muestra(k-1) < Muestra(k) > Muestra(k+1) \quad (4.1)$$

2. Y la condición de umbral:

$$< umbral_{IDP_{inf}} < muestra(k) < umbral_{IDP_{sup}} \quad (4.2)$$

Donde $muestra(k)$ es la muestra de la señal analizada en el momento y $muestra(k-1)$ y $muestra(K+1)$ son las muestras inmediatamente anterior e inmediatamente posterior

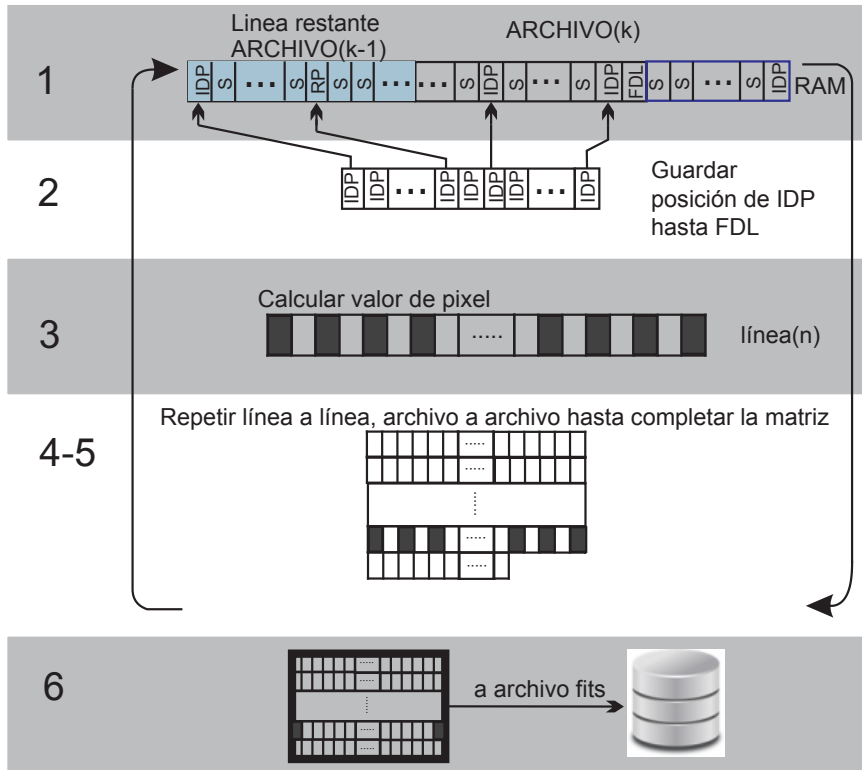


Figura 4.6 Descripción gráfica de los pasos llevados a cabo para la generación de una imagen.
Fuente: Elaboración Propia

respectivamente. $umbral_{IDP_{sup}}$ e $umbral_{IDP_{inf}}$ marcan niveles mínimo y máximo permitidos para un Inicio de Pixel (IDP).

La posiciones en memoria de las muestras que cumplen con la condiciones de las ecuaciones 4.1 y 4.2 se guardan en un *buffer*. Esas posiciones deben ser verificadas por un filtro de corrección para descartar la detección de Inicios de Pixel (IDP) falsos y/o rellenar en un IDPs perdidos. Estos errores pueden ser generados por píxeles saturados que deforman la señal a su alrededor como se muestra en la Figura 4.7. Es importante tener en cuenta que cualquier error detectado de algún pixel producirá una fila desalineada en la vertical que corromperá la imagen. El algoritmo desarrollado para corregir los errores de IDP utiliza la distancia conocida entre los píxeles para verificar si la separación de píxeles consecutivos es correcta. Si la distancia es menor o mayor que la distancia conocida con pequeño rango de tolerancia, se realiza un proceso de descarte o llenado según sea el

caso. La detección de IDPs se ejecuta hasta un evento de fin de línea , luego se ejecuta el siguiente paso.

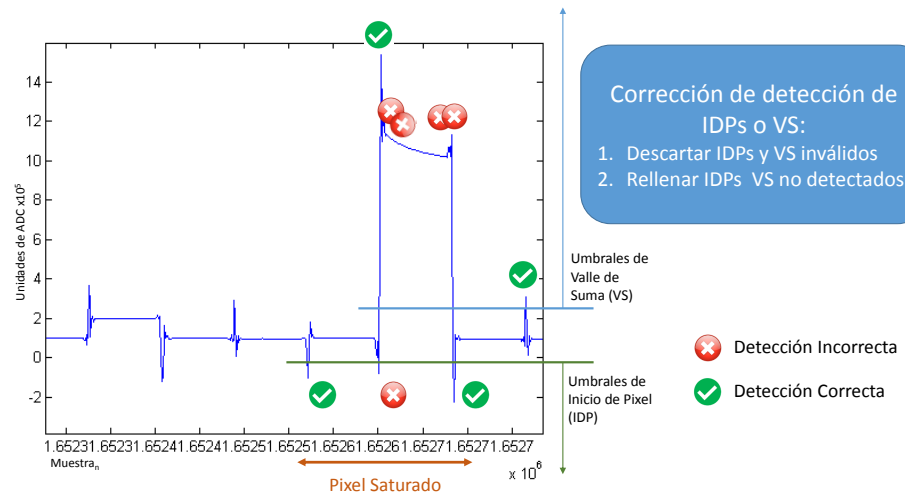


Figura 4.7 Se muestra la distorsión producida por un pixel saturado (nivel de tramo de *signal* mucho mayor a nivel de tramo de pedestal). Esta condición hace que algunos picos se detecten erróneamente como Inicios de Pixel (IDPs) o Valle de Sumas (VSs). Estos errores deben ser corregidos evaluando la distancia entre los IDPs y VSs detectados.

Fuente: Elaboración Propia

El tercer paso realiza el cálculo de píxeles utilizando por defecto la fórmula dada por el método DCDS descrita en la sección 2.4.1:

El cuarto paso representa un bucle que incluye al segundo y tercer paso. Esto simplemente significa que los mismos pasos de búsqueda de inicio de píxeles y posterior cálculo del valor de pixel se ejecutan para cada línea hasta llegar al final de cada una, para luego empezar de nuevo con el segundo paso, pero de la siguiente línea.

Cada línea de píxeles ya calculada se guarda en una matriz de imagen en la memoria.

El quinto paso representa un bucle que repite todos los pasos del uno al cuarto para cada archivo que conforma la imagen. Es decir que posibilita que el software ejecute la búsqueda de inicio de píxeles y el cálculo del pixel para cada línea dentro de un mismo archivo y así con todos los archivos uno por vez. Al comienzo de este bucle el software debe ser capaz de retener la eventual línea incompleta del último archivo para poder completarla con el archivo consecutivo antes de iniciar el procesamiento (debido a la división de la imagen en varios archivos). Este proceso se repite hasta el final de la imagen.

Finalmente, la matriz de la imagen se guarda en formato FITS (*Flexible Image Transport System* por sus siglas en inglés) en el sexto y último paso.

Aunque aparentemente es una cadena de procesos sencilla, teniendo en cuenta que son claramente visibles e identificables las partes de la señal que marcan las partes de interés, es más complicado lograr esto de forma fiable y autónoma vía software. Más aun cuando la señal en cuestión puede tener pequeñas variaciones en su forma y esté dividida en archivos. Es por eso que ante de empezar el cálculo de píxeles debe existir algún proceso que permita establecer los parámetro de búsqueda que se ajusten a la señal actual. Este proceso se denomina proceso de auto-calibración y se explica en la sección 4.5.

4.4. Descripción del proceso de detección de picos

La principal actividad en el proceso de reconstrucción de la imagen consiste en localizar los eventos en la señal donde se encuentren los tramos de interés, calcular los píxeles y ubicarse en la imagen para ordenarlos en filas. Como se vio en Figura 4.1, los eventos de IDP, FDL y VS son picos en la señal y aunque se produzcan variaciones en la forma, amplitud y pendiente de estos picos, estas se mantendrán siempre en un rango dado. Esta situación puede ser aprovechada eligiendo un método de detección adecuado. Uno de los métodos analizados fue el de identificar los picos cuando la señal alcanza un nivel determinado. Sin embargo, usar solamente esta condición se podría causar falsas detecciones en determinadas situaciones como píxeles saturados, por lo que no sería aconsejable utilizar solamente este método. En la Figura 4.8 se observan algunos ejemplos de errores que podrían producirse al usar este método para detectar los picos.

Otro método analizado fue el de medición de la variación entre píxeles consecutivos o pendientes. En una señal donde las muestras se representan por $muestra_k$, una muestra estaría en la cima de un pico si cumple la siguiente condición:

$$muestra(k-1) < muestra(k) > muestra(k+1)$$

O incluso se podría usar para la verificación una condición mas reforzada:

$$muestra(k-2) < muestra(k-1) < muestra(k) > muestra(k+1) > muestra(k+2)$$

Donde $muestra(k)$ es la muestra de la señal analizada en el momento y $muestra(k-n)/muestra(k+n)$ son las muestras en el instante n anterior o posterior respectivamente. En la Figura 4.9 se puede visualizar gráficamente esta condición, sin embargo también se muestra como un ruido aditivo puede hacer que esta condición se cumpla.

El método finalmente seleccionado fue una combinación de ambos métodos descritos. Por ejemplo, para que una muestra sea detectada como la cima de un pico deberá cumplir

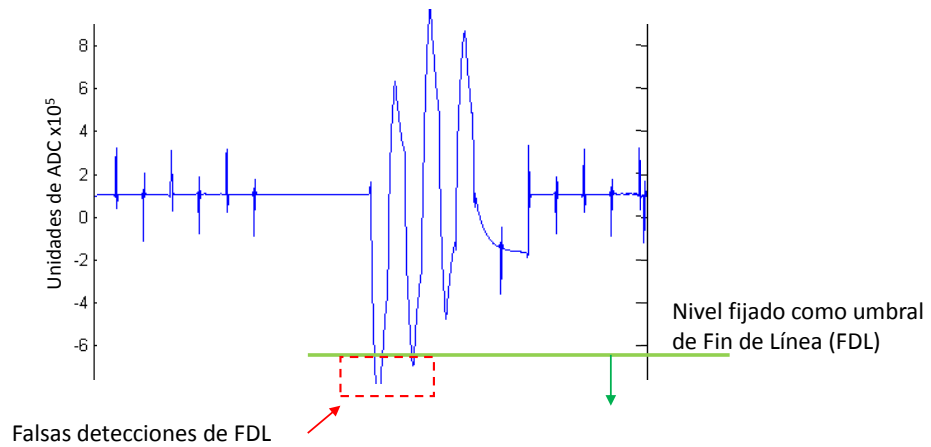


Figura 4.8 Se muestran los errores producidos al usar solamente un umbral de nivel como condición suficiente para un evento. Todas las muestras que superen ese nivel que están marcadas por el cuadro rojo cumplen la condición y podrían considerarse erróneamente como una muestra IDP o VS.

Fuente: Elaboración Propia

la condición de pico descrita y, además, esta muestra debe tener un nivel que caiga dentro de un rango determinado.

Para cada uno de los eventos buscados (inicio de pixel, valle de suma, fin de línea y fin de imagen) se puede establecer los rangos máximo y mínimo de valores que debe cumplir una muestra, además de la condición de pendientes (condición de pico) para ser considerados como un evento de Inicio de Pixel, de Vall de Suma, o según corresponda.

Para los eventos de Inicio de Imagen (IDI) y Fin de Imagen (FDI) se usa una metodología diferente. En el primer caso se optó por examinar el valor cuadrático medio de la señal por tramos. El valor cuadrático medio del ruido es mucho menor que el de la imagen, por lo que en el tramo en que éste aumente en un porcentaje prefijado, se podrá afirmar que la lectura del CCD ha iniciado. En el caso del evento de fin de imagen, luego del último pico de fin de línea, si no se detecta el siguiente inicio de pixel en un tramo prefijado se puede afirmar que la señal de imagen ha terminado y la imagen está completa.

Queda claro que se podrían detectar los eventos evaluando estas condiciones y esto haría al software independiente de las variaciones de ciertos parámetros característicos de la señal, como el sampling rate, cambios en el tiempo de integración, variaciones en la amplitud de los picos, etc. Pero para que esto se pueda aplicar, todos los rangos de valores validos para un evento y distancias tienen que estar establecidos antes de empezar la búsqueda. Por ejemplo, es posible que la amplitud de la señal varíe de una imagen

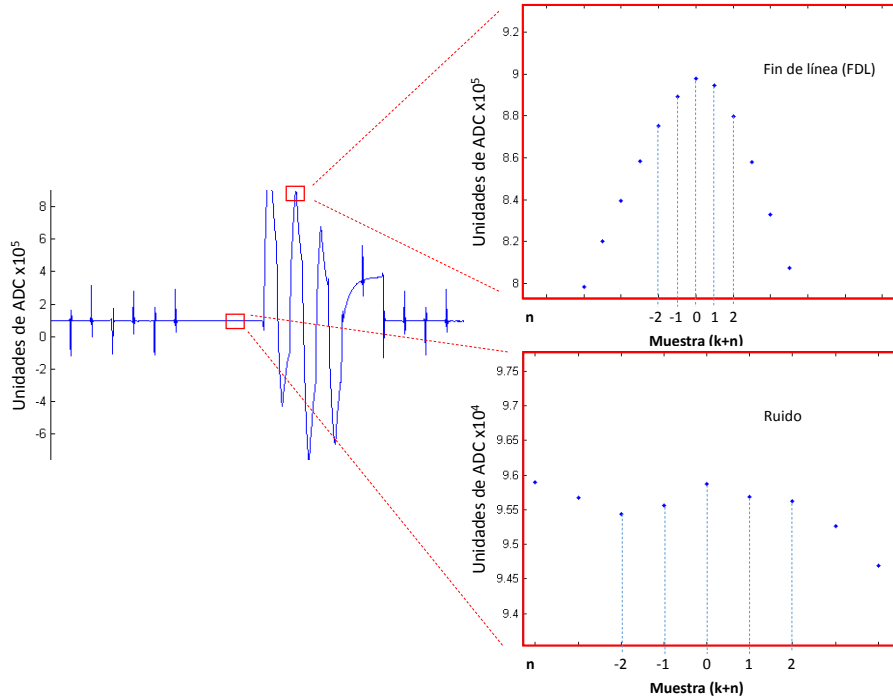


Figura 4.9 Se observa como un pico de Fin de línea (fdl) puede ser detectado como Fin de línea (FDL) si cumple la condición $Muestra(k-2) < Muestra(k-1) < muestra(k) > Muestra(k+1) > Muestra(k+2)$. Sin embargo, si solamente se evalúa esta condición, un tramo cualquiera de la señal afectado por ruido podría también ser detectado erróneamente como FDL por ejemplo.

Fuente: Elaboración Propia

a otra debido a un cambio la ganancia de del amplificador de salida. Entonces el valor de umbrales válidos para la búsqueda de inicio de pixeles también cambiaría al variar la amplitud. Esto se muestra en la Figura 4.10.

Es deseable que el software encuentre estos parámetros y rangos de valores de forma autónoma, sin necesidad de que el usuario necesite configurar los parámetros ante cada cambio de la señal del CCD. El programa propuesto realizará estos ajustes a través del proceso de auto-calibración, que se describe en el próximo apartado.

4.5. Descripción del proceso de auto-calibración

El proceso de auto-calibración tiene como objetivo establecer los parámetros necesarios para detección confiable de eventos de IDI, FID, FDL, IDP, VS y IW (descritos en la

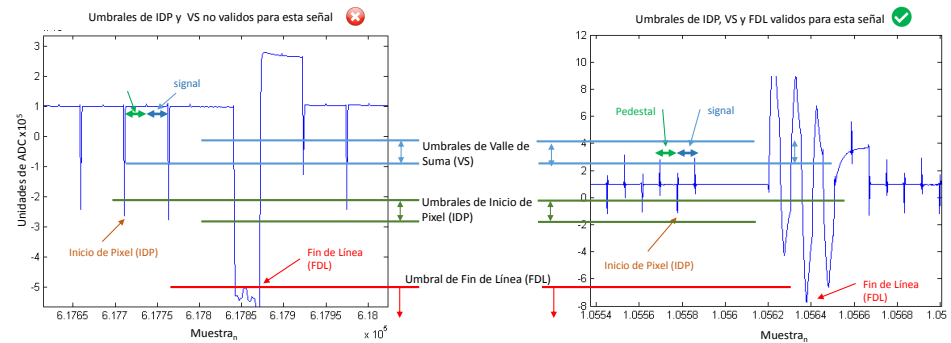


Figura 4.10 Se muestra como los umbrales de VS y IDP establecidos para la señal de la derecha no son validos para la señal de la izquierda. Por lo tanto sería necesario que el software se auto-calibre para procesar la señal de la izquierda. En este caso ambas señales están invertidas por lo que los picos de VS son positivos.

Fuente: Elaboración Propia

sección 4.1) presentes en las señales de entrada. Se divide la descripción del proceso de auto-calibración en tres partes a continuación:

4.5.1. Parámetros requeridos para la detección

Antes de poder iniciar el método de auto-calibración, es necesario reconocer los parámetros requeridos para la detección correcta de los eventos, que de ahora en más llamaremos Parámetros de Detección (PD). Estos son:

- Umbral de Fin de línea (FDL)
- Umbral de Inicio de Pixel (IDP)
- Umbral de Valle de Suma (VS)
- Guarda de Transitorios (GT)
- *Integration Window* (IW)
- Distancia entre Pixeles consecutivos (DPC)
- Distancia entre FDL y primer IDP de la siguiente línea (DFPI).

Además este proceso se encarga de detectar el IDI y comprobar la coherencia de la señal de imagen después de hallar todos los parámetros. Luego transfiere el mando al proceso de detección de eventos.

4.5.2. Características de las señales de CCD

Los métodos para hallar los parámetros y eventos se basan en que las señales de CCDs que utilizan un circuito de lectura basado en el de la sección 2.3 comparten ciertas características. Estas se derivan del estudio de las señales y se describen a continuación:

1. Los picos de FDL tienen mucho mayor amplitud que los de VS o IDP. Aunque los picos de FDL tienen amplitudes aproximadas, puede existir una variación significativa en los FDL en una misma imagen.
2. Antes del primer pico de FDL y entre dos FDL consecutivos, los picos con mayor amplitud son los IDP y VS, y además tienen polaridades opuestas si se toma el valor medio de la señal antes de IDI como nivel 0.
3. El primer evento en la señal de imagen es un IDP.
4. el ultimo evento antes de un fin de línea es un VS.
5. El valor cuadrático medio de la señal aumenta drásticamente durante el evento IDI.
6. La distancia entre dos eventos del mismo tipo debe mantenerse durante toda la duración de una imagen. Por ejemplo entre dos IDPs consecutivos o FDLs consecutivos. La distancia se mide en número de muestras entre dos puntos. No se puede hablar de una distancia constante debido a que en la mayoría de los casos los periodos de los eventos no son múltiplos del periodo del convertidor analógico-digital, por lo que la distancia entre eventos del mismo tipo podría ir variando mínimamente. Por ejemplo la distancia entre IDP consecutivos puede ir variando entre 111 a 110 muestras en una misma imagen.

4.5.3. Flujo del proceso de auto-calibración

Usando las características descritas en el apartado anterior es posible hallar los parámetros de detección (PD) necesarios para el proceso de detección y calculo de pixeles. La Figura 4.11 ilustra de forma simplificada el flujo seguido para la auto-calibración el software, cuya descripción se da a continuación:

1. Se carga el primer archivo y se hace pasar la señal con un filtro pasabajas digital con alto factor de suavizado. Se analiza la señal filtrada y también sin filtrar. Lo que se hace es calcular el valor medio de la señal filtrada y compararlo con los valores absolutos de los máximos de los picos de ese mismo tramo de 1000 muestras en la señal **sin filtrar**. Se hace uso de la característica 5 para afirmar que si hay una

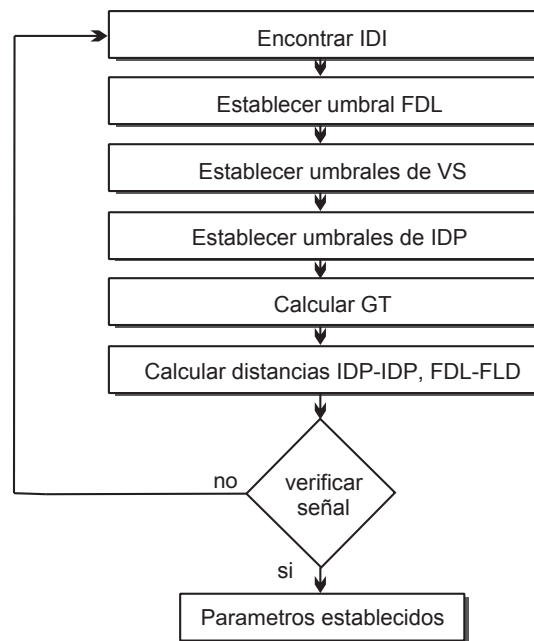


Figura 4.11 Diagrama de flujo simplificado del proceso de auto-calibración.
Fuente: Elaboración Propia

diferencia de al menos 1000 unidades de ADC se ha producido un evento en la señal que no fue provocado por ruido. En este momento se sabe que la imagen ha comenzado (IDI). Si no se detecta el IDI en el primer archivo, se van cargando los siguientes hasta detectarlo. En caso de que no se detecte se ira indicando en cada archivo el mensaje “no signal” al usuario, y si después de analizar la totalidad de los archivos no se detecto el IDI, se mostrará un mensaje de error. Se utiliza el filtro pasabajas para evitar que el valor medio de la señal en el tramo de 1000 muestras sea alterado en el momento que comienza la imagen. En la Figura 4.2 se muestra un IDI.

2. Una vez detectado el Inicio de Imagen se usa la característica 1 para buscar el pico de mayor amplitud en la primera linea. Para asegurar que se recorra al menos una línea se hace la búsqueda en tres archivos consecutivos. El valor en ADU de la muestra de ese pico máximo se usa para establecer el umbral de FDL. Como se espera que las amplitudes de los picos de FDL varíen en un rango determinado, se establece el umbral del rango en un valor al 70 por ciento de la amplitud del pico máximo hallado.

Esto es teniendo como referencia el nivel medio de la señal antes del IDI y no el nivel 0. En la Figura 4.13a) se puede observar un ejemplo de umbral para detección de FDL con respecto a la señal.

3. En este paso se busca el segundo FDL (cargando archivos consecutivos si es necesario) y se usa la característica 4 para hallar el ultimo VS de la segunda línea. La razón del uso de la segunda línea en lugar de la primera yace en que puede existir algunos transitorios que distorsionan la señal al comienzo de la imagen como se muestra en la Figura 4.12. Con el valor de este pico de VS se establecen los umbrales para el valor encontrado en ± 40 por ciento de su amplitud sobre el valor medio de la señal antes del IDI. En este caso es necesario establecer un umbral superior e inferior, a diferencia del umbral de FDL en donde se sabe por la característica 1 que no hay en la señal picos con amplitudes mayores. Por lo tanto estableciendo un umbral superior hace que la búsqueda sea fiable. En el caso de los VS el hecho de establecer solamente un umbral inferior podría hacer que un FDL se detecte como un VS ya que también se cumpliría la condición de pico y nivel para VS descrita en la sección 4.4. En la Figura 4.13a) se pueden observar ejemplos de umbrales para detección de VS con respecto a la señal.

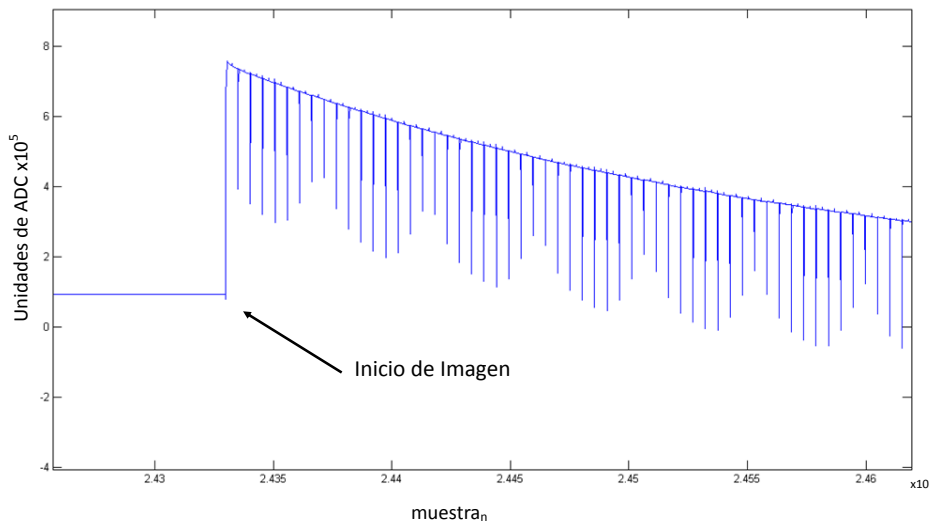


Figura 4.12 Inicio de Imagen (IDI) distorsionado por transitorios. Debido a esto, la primera línea de la imagen debe ser descartada.

Fuente: Elaboración Propia

4. Para el umbral de IDP no se puede usar la característica 3 debido la distorsión ocasionada por los transitorios en el IDI como se observa en la Figura 4.12. Por lo tanto se usa la característica 2 para hallar los umbrales. Se empieza a recorrer la señal desde la mitad de la segunda línea hasta la posición del ultimo VS de la línea. El pico de mayor amplitud y de polaridad opuesta con respecto al nivel medio es con certeza un IDP. A partir de ahí se establecen los umbrales para los IPDs como el valor de ese pico ± 40 por ciento de su amplitud sobre el nivel medio antes del IDI. En la Figura 4.13a) se pueden observar ejemplos de umbrales para detección de IDP con respecto a la señal.
5. La distancia de Guarda de Transitorio (GT) se obtiene midiendo cuantas muestras tarda en establecerse el nivel de pedestal o *signal* a partir de un pico de IDT o VS. Esto se hace midiendo la variación del valor cuadrático medio de cada muestra a partir de un pico IDT o VS al elegido al azar. A la distancia hallada se le suma una distancia adicional de seguridad del 10 por ciento. En la Figura 4.13b) se ilustra la distancia GT en la señal.
6. Con todos los umbrales establecidos, se hace una búsqueda de dos IDP consecutivos al azar para medir la distancias entre ellos. Luego halla el VS intermedio entre los dos IDPs y junto con el valor de GT se pueden establecer los tiempos de integración (en numero de muestras) del tramo de pedestal y del tramo de *signal* IWP e IWS respectivamente. Estos normalmente son iguales pero se deja la posibilidad de que sean diferentes. Como ultimo parámetro se miden las distancias entre dos FDLs consecutivos y de esta forma todos los parámetros de detección están establecidos. En la Figura 4.13b) se ilustran el IWP e IWS.
7. Como ultimo paso se hace una verificación de coherencia de la señal. Esto consiste en hallar 100 IDPs consecutivos y 4 FDLs y verificar que la distancia entre ellos sea la esperada. En este punto el software muestra el mensaje 'signal ok' y pasa el mando al proceso de detección y calculo de valor de pixel. Por conveniencia la primera línea de la imagen es descartada y el procesamiento efectivo empieza desde la segunda línea de la imagen.

4.6. Descripción del proceso de calculo de pixeles y conformación de lineas

El método de calculo de pixel se refiere a la forma en que el software usa las muestras disponibles en el tramo de pedestal y en el tramo de *signal* del pixel (ya identificado y

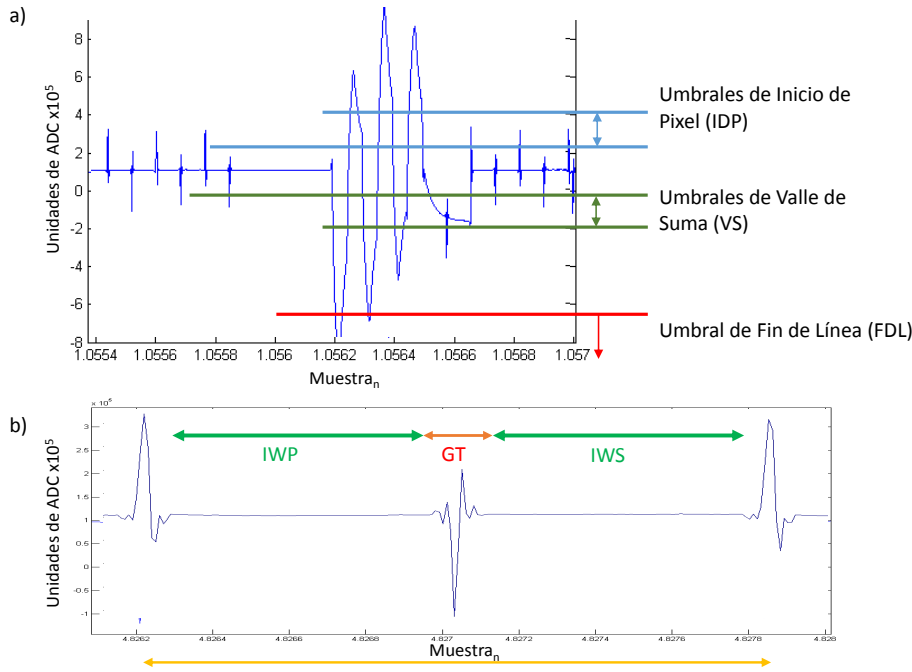


Figura 4.13 Umbral para los eventos y las distancias descritas en la sección 4.1. En la parte a) se muestran los parámetros relacionados con la amplitud, mientras que en la parte b) muestra los parámetros relacionados con distancias (en numero de muestras).

Fuente: Elaboración propia

aislado) para calcular el valor que representará a ese pixel en la imagen final. Este método podría ser el tradicional DCDS, en donde se calcula el valor promedio de cada tramo y luego se calcula la diferencia entre esos para hallar el valor del pixel; o podría ser un proceso mas complejo, por ejemplo se podría usar un filtro digital previo a la aplicación del DCDS tradicional como algún filtro pasabajo o un filtro supresor de frecuencias en el caso de que alguna señal de la electrónica de lectura este introduciendo esta señal indeseable. Otra opción implica el uso de un métodos mas avanzados para el calculo del pixel como los discutidos en la sección 2.4. Estos usan una curva para dar pesos a las muestras según su posición con respecto al valle de suma. Esta curva esta diseñada de forma que minimiza el ruido o algún otro parámetro. Los métodos mas avanzados generan mayor carga computacional puesto que se necesitan más pasos para hallar el valor de un pixel.

La conformación de líneas es relativamente sencilla. Se van calculando los valores de los pixeles consecutivos hasta encontrar una señal de fin de línea (FDL). Luego se comprueba

que esta línea tiene la cantidad de píxeles que corresponden (cantidad previamente hallada por el proceso de auto-calibración) y se almacena en una matriz en memoria RAM. En el caso de que una línea esta incompleta o se encuentre una incoherencia se excluirá esa línea y se pasara directamente al proceso de guardado. Una incoherencia puede darse cuando falta algún archivo, de esta forma un tramo de una señal de pixel queda discontinuo y hace que no pase la comprobación. Todas las longitudes correctas (distancias entre eventos) son calculadas en el proceso de calibración y se usan para la comprobación, brindando así una mayor confiabilidad.

4.7. Descripción del proceso de guardado

El proceso de guardado es bastante simple y consiste en generar un archivo FITS (*Flexible Image Transport System* por sus siglas en inglés) a partir de la matriz que representa la imagen que está en memoria al llegar a este paso. Un fichero FITS podría contener varias extensiones, y cada una de ellas podría contener datos de un objeto. Por ejemplo, es posible almacenar imágenes de rayos X y también imágenes pertenecientes al infrarrojo en el mismo archivo FITS, esto se logra guardando las imágenes de los canales multiplexados en los archivos. Se utilizo la librería CFITSIO (*C Fits Input/Output* por sus siglas en inglés) del HEASARC (*High Energy Astrophysics Science Archive Research Center* por sus siglas en inglés) de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration* por sus siglas en ingles). Esta librería permite utilizar simples comandos desde el lenguaje C/C++ para almacenar fácilmente la matriz de imagen (ya en memoria) en un archivo FITS.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

El funcionamiento del software creado se verificó a través de la lectura de un CCD de prueba instalado en el Laboratorio SiDet del Fermilab. Durante las pruebas se buscó verificar el funcionamiento del software en cuatro ejes principales:

- La capacidad de producir una imagen a partir de la señal digitalizada y almacenada.
- La capacidad de auto-calibración ante cambios en la señal.
- Facilidad de agregado de filtros y métodos de calculo de pixeles.
- Velocidad de procesamiento y uso eficiente de recursos de hardware.

Gracias a estas pruebas fue posible comprobar el cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio de este trabajo, y se desarrollan a continuación:

Tesis de Maestría.

Por Claudio Rodrigo Chavez Blanco

5.1. Capacidad de reconstrucción de imagen

Se llevaron a cabo pruebas con varias imágenes digitalizadas. Una imagen completa con resolución de 4000x4000 (16 Mpixeles) ocupa aproximadamente 10 GB de datos en disco. En las Figura 5.1 y 5.2 se muestran recortes de las imágenes reconstruidas por el software.

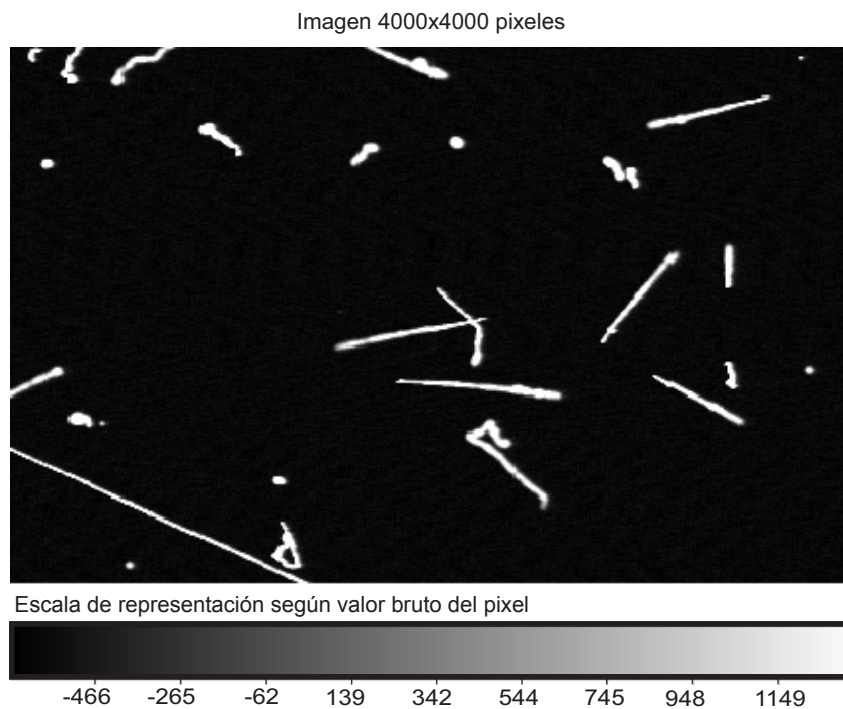


Figura 5.1 Recorte de una imagen generada a partir de archivos producidos en Fermilab. La imagen original tiene una resolución que de 4000x4000 pixels y los archivos de señal superan los 10 GB.

Fuente: Elaboración propia

No existe herramienta para analizar si una imagen fué generada correctamente. Sin embargo, se puede hacer una verificación indirecta utilizando los *hits* de las partículas en la imagen, o también a través de defectos en el CCD. Por ejemplo un *hit* ocasionado por un muon o una partícula gamma tiene una forma ya tipificada y esto puede ser usado para comprobar que todos los pixeles están alineados como corresponde en la horizontal y en la vertical y además que no existen errores en los valores leídos para cada pixel. Algunos defectos de la imagen como las líneas verticales u horizontales de pixeles saturados, como

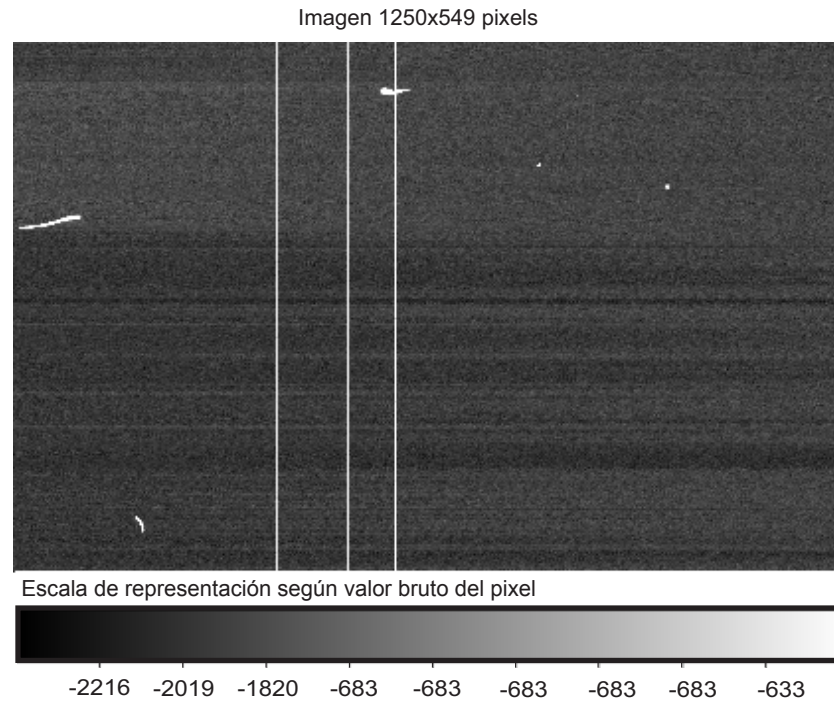


Figura 5.2 Recorte de una imagen generada a partir de archivos producidos en Fermilab. La imagen original tiene una resolución que de 1250x549 pixeles y los archivos de señal superan los 1 GB.

Fuente: Elaboración propia

las que se observan en la Figura 5.2, también sirven para este propósito. El método de verificación sirve para analizar visualmente la imagen en varios sectores de forma que se pueda comprobar estadísticamente que la imagen ha sido correctamente generada.

Nótese en la Figura 5.5 como los eventos son coherentes con las imágenes tomadas con el sistema de lectura Monsoon. También se usaron los *DAMIC Tools* (Descrito en la sección 3.3) para observar los eventos como los que muestran la Figura 5.4. Todas las formas corresponden y se observa alineación correcta en todos los sectores de las imágenes de prueba.

En la Figura 5.3 se muestra como se vería un *hit* en el caso de que hubiera un desfase entre los pixeles de la imagen. Esta imagen corresponde a las primeras pruebas del software.

a)



b)

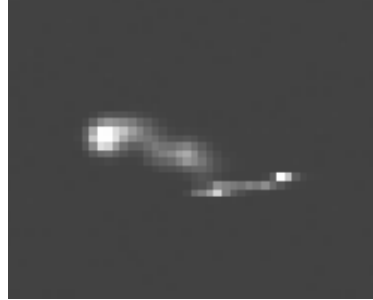


Figura 5.3 Se muestra el mismo *hit* recortado desde una imagen con errores de alineación y en una correcta. La imagen a) es la que fue generada con errores. Nótese la diferencia con la imagen b).

Fuente: Elaboración propia

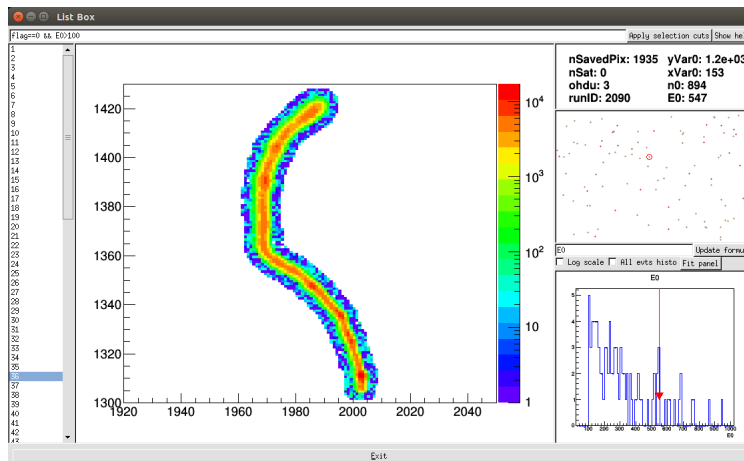


Figura 5.4 Se observa un *hit* después de hacer el análisis con las herramientas de DAMIC. Se puede apreciar que la distribución de intensidades corresponde a un *hit* de electrón. Las intensidades son mayores en los pixeles interiores y va decayendo de forma difusa por los pixeles exteriores

Fuente: Elaboración propia

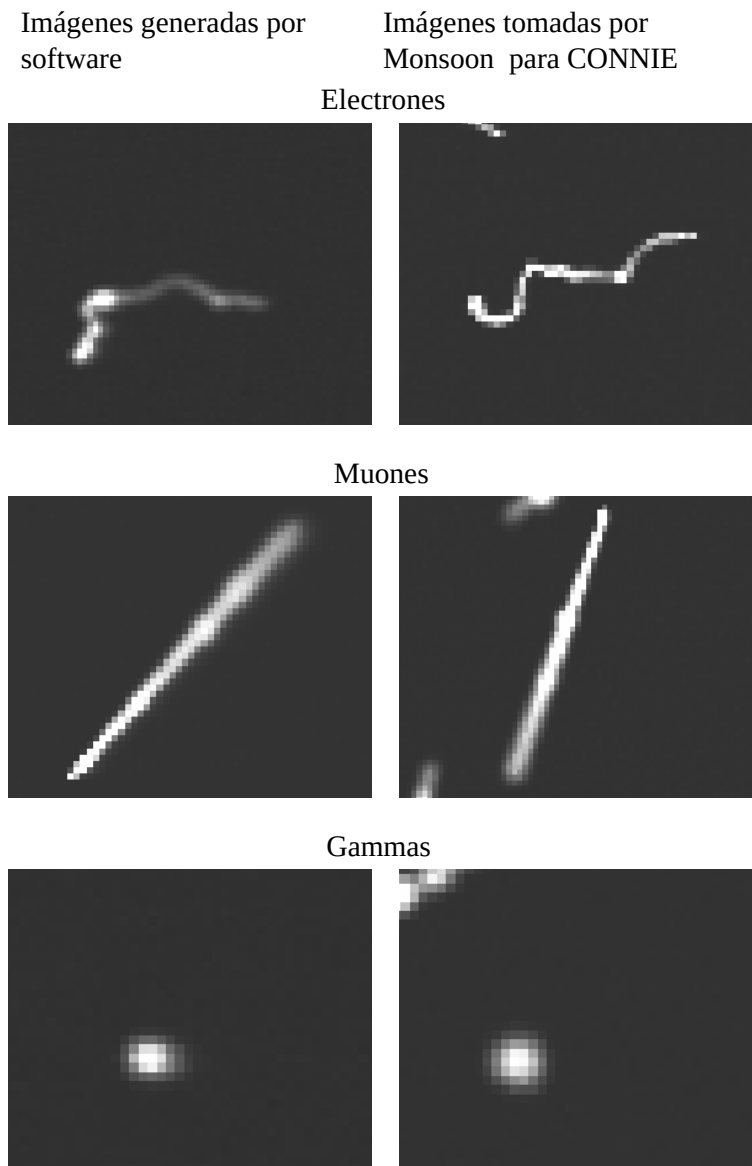


Figura 5.5 Se muestran recortes de una imagen generada por software y de una imagen tomada para CONNIE con el Monsoon. Se puede apreciar como los *hits* de la imagen generada por software tienen las mismas características y distribución de intensidad que los *hits* en la imagen de CONNIE.
Fuente: Elaboración propia

5.2. Capacidad de auto-calibración

Se hicieron pruebas con imágenes digitalizadas con dos combinaciones de hardware ligeramente distintas, tanto en el detector como en el convertidor analógico a digital. Estas diferencias producen diferencias en la señal digitalizada como se muestra en la Figura 5.6.

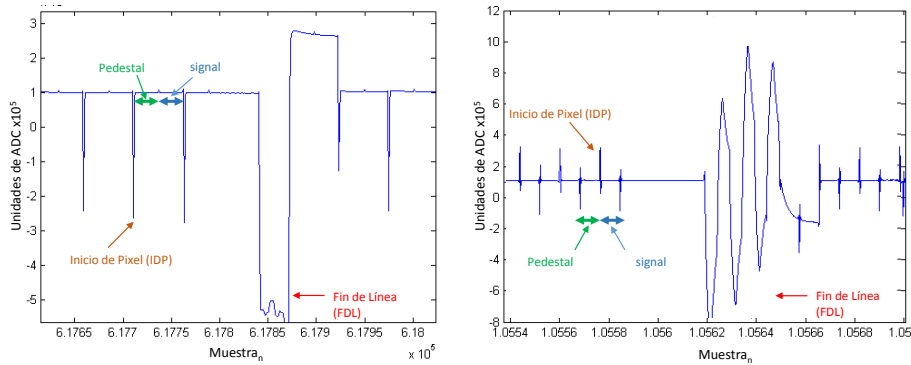


Figura 5.6 Se muestran dos señales tomadas con combinaciones de hardware distintas. Se puede observar grandes diferencias entre las amplitudes y formas de los eventos de Inicio de Pixel (IDP), Valle de Suma (VS) y Fin de Línea (FDL). La señal mostrada a la izquierda fue adecuada con un amplificador inversor. Debido a esto los IDP y VS tienen direcciones opuestas en las señales.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.6 se observa que existe una gran diferencia entre las amplitudes y entre los transitorios de las señales de Inicio de pixel y de Fin de línea. También los picos de valle de suma son muy inferiores y variables en la de señal de la izquierda. Sin embargo, los algoritmos de auto-calibración permitieron generar las imágenes sin necesidad de ninguna configuración por parte del usuario. Las Figuras 5.1, y 5.2 muestran recortes de imágenes generadas a partir de los dos tipos de señales.

La segunda serie de pruebas consistió en modificar el *offset* y la amplitud de las señales vía software. Esto es simplemente multiplicar toda la señal por un factor y sumarle un valor constante antes del procesamiento. Para las pruebas que se hicieron utilizando el CDS simple estos cambios no supusieron ningún problema en la generación de la imagen, aunque los efectos sí fueron reflejados en el valor medio total de la imagen. Por ejemplo, el hecho de amplificar toda la señal por un valor constante, hace que el valor medio de la imagen que multiplicado por este mismo valor. En el caso de agregar un *offset* a la señal no tiene ningún efecto en la imagen. Esto es coherente con lo esperado, ya que el valor de un pixel se calcula hallando la diferencia entre los valores medios del tramo de pedestal y el *signal*, lo que hace que ese *offset* sea anulado en el cálculo.

5.3. Agregado de filtros y métodos de cálculo de píxeles

Una de las principales opciones útiles que brinda el software es la de poder agregar fácilmente filtros digitales solo a los tramos de pedestal y *signal* para después hacer el CDS simple o usar algún nuevo método optimizado para el cálculo del valor del pixel, o toda la señal si se quiere. Por el momento la forma de hacer esto es modificar unas pocas líneas de código. En la Figura 5.8 se muestra el *loop* encargado de recorrer todas muestras del tramo de *signal* y pedestal para hacer el cálculo del valor del pixel. En el caso mostrado en la Figura, un simple filtro pasabajas de un polo fué aplicado. Donde y_j y y_{j-1} son las salidas actual e inmediatamente anterior del filtro respectivamente, x_j es su entrada actual y α es el factor de suavizado.

Este filtrado de ejemplo no tuvo mucho impacto en la imagen. Tampoco se hicieron estudios de ruido en las imágenes filtradas, ya que el objetivo fue probar la capacidad de implementación rápida de un filtro digital por software. Sin embargo, el efecto del filtro sobre la señal se puede observar en la Figura 5.7

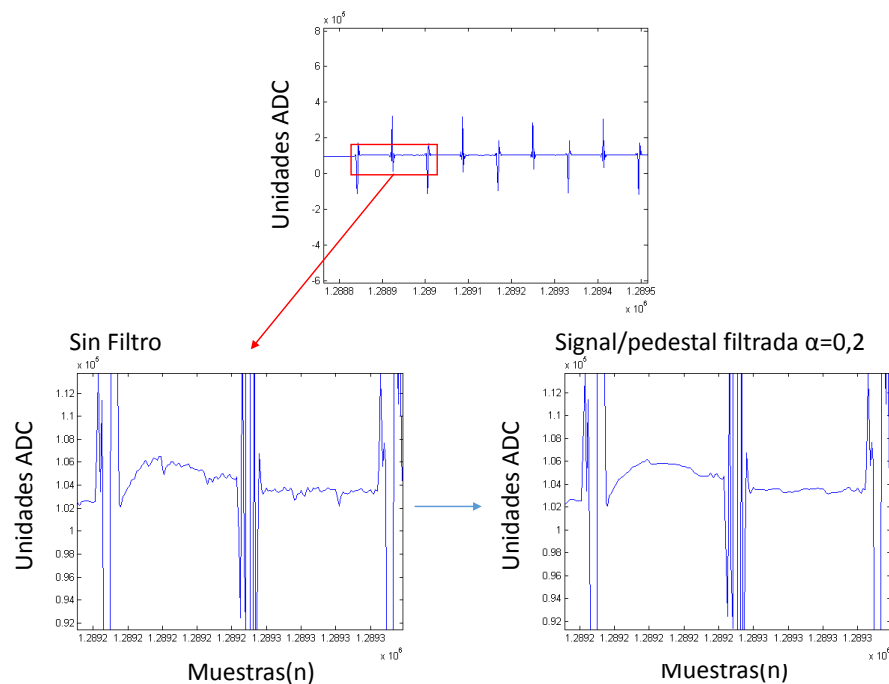


Figura 5.7 Efecto de la aplicación de un filtro pasabajas simple en los tramos de *signal* y pedestal. Se observa como dichos tramos quedan suavizados tras la aplicación de filtro.

Fuente: Elaboración propia

En el caso del método de cálculo de pixel se vuelve a hacer referencia a la Figura 5.8. En este caso, en lugar de hacer una suma directa de las muestras correspondientes a los pedestal y *signal* en las variables **SumaP** y **SumaS**, se tendría que hacer una suma ponderada como se mostró en la sección 2.4. La formula a aplicar seria:

$$SumaP = \sum_n^m a_j x_j$$

$$SumaS = \sum_u^v b_j x_j$$

en donde a y b podrían ser los coeficientes optimizados del método discutido en la sección 2.3 y x_j son las muestras en el rango $[m,n]$ del tramo de pedestal, y $[u,v]$ las del tramo de signal. El equivalente de x_j en el código mostrado en la figura es $*(filedata+j)$.

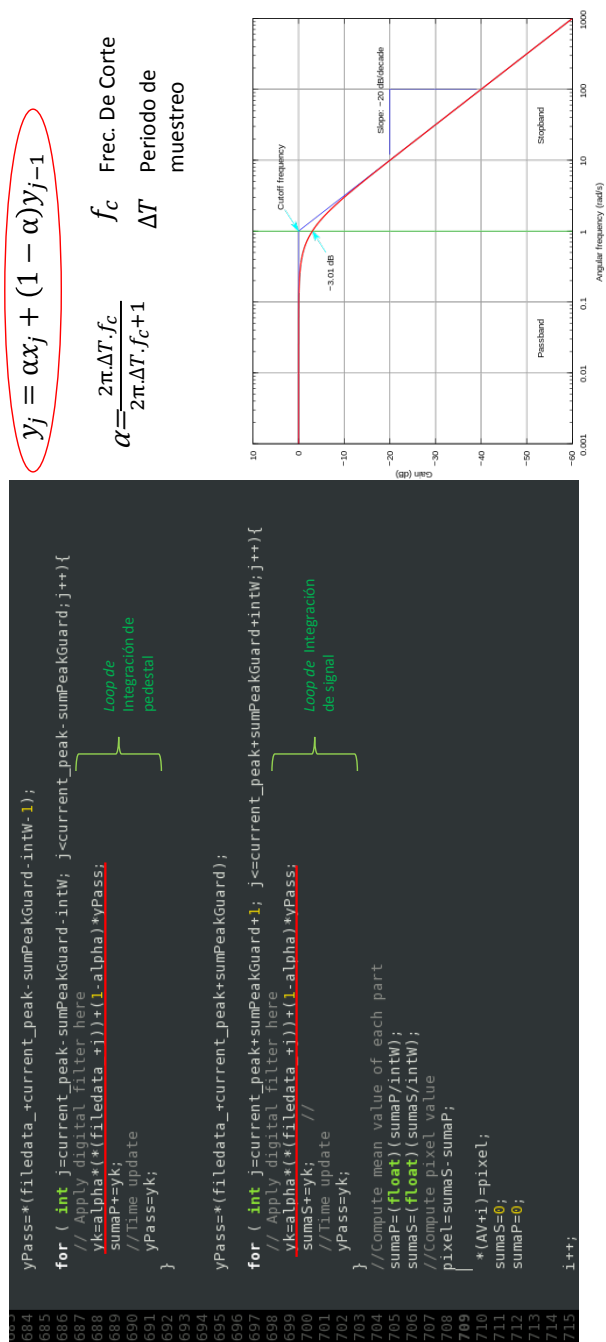


Figura 5.8 Fragmento de código del software en donde se muestra de aplicación de un filtro digital. Las equivalencias en el código son $y_j \rightarrow yk$, $y_{j-1} \rightarrow yPass$, $\alpha \rightarrow alpha$ y $x_j \rightarrow *(filedata_+j)$.
Fuente: Elaboración propia

5.4. Velocidad de procesamiento y uso eficiente de recursos de hardware

Aunque no es posible determinar de antemano la eficiencia del software, durante la etapa de programación se tomaron algunas medidas para que el software final trabaje de la forma mas rápida y eficiente posible. Estas medidas se citan a continuación:

- Uso mínimo de variables y uso de RAM de forma dinámica. Esto ultimo significa que la memoria se reserva según necesidad y se vuelve a liberar tan pronto como se deje de usar.

- Control eficiente de *bucles* (bucles) para minimizar la cantidad de ciclos innecesarios. Por ejemplo, cuando ya se cumplió una condición buscada en determinados casos es posible detener el *loop* o hacer que pase al siguiente ciclo sin terminar las instrucciones del actual.

- Acceso mínimo al disco, ya que todos los archivos de señal se cargan en memoria una sola vez.

Un test de rendimiento básico fue ejecutado usando las herramienta “*ps*” del sistema operativo Linux y otros *scripts* de terceros. La prueba se ejecuto con una imagen cuyos archivos juntos ocupan 6.5 GB en disco. El procesador es un AMD Opteron 6300 Series® y el tiempo total usado para generar la imagen a partir de la orden fue de aproximadamente 18 s. En la figura 5.9 se muestran el uso de CPU, RAM y unidad de disco durante la generación de la imagen usando un CDS simple.

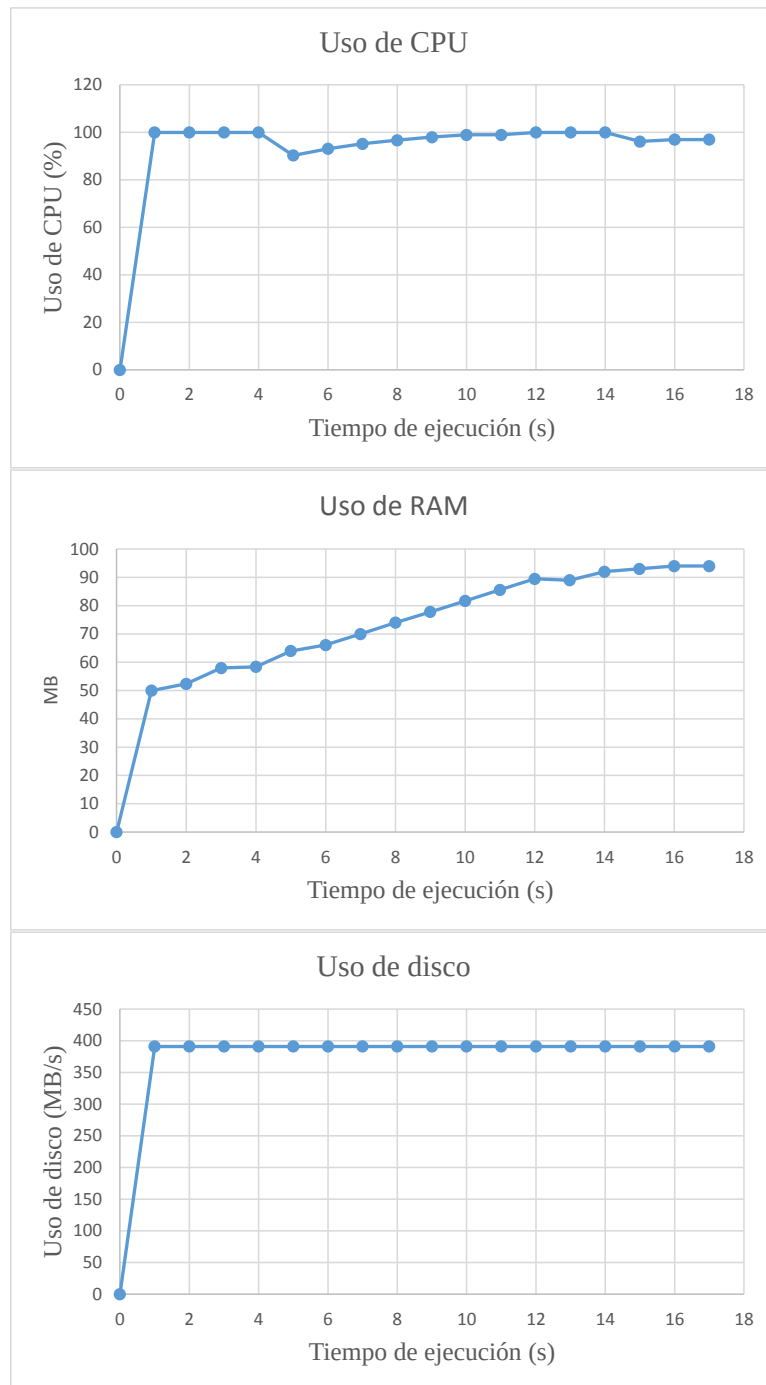


Figura 5.9 Datos de rendimiento de software durante la generación de una imagen sin filtrado digital añadido.

Fuente: Elaboración propia

5.5. Conclusiones y trabajos futuros

5.5.1. Conclusiones

La lectura de las señales de CCD basada en software es una opción muy útil para las etapas de desarrollo de un sistema de hardware / software más complejo. Como se expuso, es posible realizar una reconstrucción completa de la imagen de manera fácil y eficiente a partir de señales CCD de escaneo lento digitalizadas utilizando solo el procesamiento por software. Aunque una sola imagen grande necesita varios GB, solo unas pocas imágenes pueden digitalizarse y luego usar el procesamiento por software para probar las técnicas de cálculo de píxeles, filtrado digital o ecualización. La flexibilidad del método basado en software permite probar estas opciones sin cambiar el hardware y comparar los resultados con el mismas imágenes de origen utilizando herramientas de análisis de imágenes. El tiempo que usa el software para el procesamiento se considera aceptable, ya que aproximadamente fue de un segundo por cada 0.36 GB de datos en la plataforma de prueba con uso mínimo de memoria. Esto es importante debido a que el software esta pensado para usarse en un entorno remoto multiusuario. El código se puede usar en sistemas embebidos con pequeños cambios, o puede optimizarse para ejecutarse como una aplicación independiente en un soft-processor personalizado sintetizado en un FPGA (como Microblaze®) para la extracción rápida de imágenes en línea. Esta podría ser necesaria para leer imágenes de varios CCD al mismo tiempo sin almacenar muestras. También puede usarse como base para sistemas de adquisición basados en software de forma a reducir la complejidad del hardware.

No son menos importantes los conocimientos adquiridos y durante este trabajo en los campos de análisis de imagen, procesamiento de señal, electrónica de detectores CCDS y programación en C++/ROOT que fueron aplicados y concluyen con éxito este trabajo, además de poder ser usados para extender este u otros trabajos relacionados.

5.5.2. Trabajos futuros

- Extender el algoritmo de forma a que pueda utilizarse de forma online, es decir, sin guardar la señal previamente en disco.
- Está previsto a largo plazo la modificación del sistema de agrupación de los CCD, de tal forma a que se pueda incorporar una gran masa de detector hasta llegar a 10 Kg. Para éste propósito, será necesario replantearse cómo diseñar una nueva magnitud para el detector, ya que no es realizable el plan de escalar los CCDs con el tamaño actual, lo que implicaría la utilización de aproximadamente 220 CCDs,

que en la practica sería imposible de realizar. Por este motivo se comenzó a pensar en la posibilidad de hacer largas tiras de CCD intercalas con los sistemas de lectura, evitando así el uso de cables largos que dificultan la utilización del espacio reducido del que se dispone. Para este tipo de futuro desarrollo, esta herramienta será de vital importancia, ya que el análisis online será imprescindible.

Para obtener una copia del código fuente del software contactar a Claudio Chavez en rchavez@ing.una.py.

REFERENCIAS

- [1] J. R. Janesick, *Scientific charge-coupled devices*. SPIE press Bellingham, Washington, 2001, vol. 117.
- [2] A. Di Paolo, M. Sofo, J. J. Blostein, M. Gomez, M. Fernández, G. Cancelo, and J. Estrada, “Puesta en funcionamiento y caracterización de un ccd como detector de partículas, radiación y materia oscura,” in *Conferencia 99 Reunión Anual de la Asociación Física Argentina*, Jun 2014.
- [3] R. Liu, J. Lu, J. Ding, and Y. Liu, “Ccd signal processing based on correlated double sampling,” in *Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on*, May 2011, pp. 1–3.
- [4] M. H. White, D. R. Lampe, F. C. Blaha, and I. A. Mack, “Characterization of surface channel ccd image arrays at low light levels,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, Feb 1974.
- [5] R. J. Karsy, “Response of a correlated double sampling circuit to 1/f noise [generated in ccd arrays],” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 15, no. 3, pp. 373–375, Jun 1980.
- [6] J. Gach, D. Darson, C. Guillaume, M. Goillandeau, C. Cavadore, P. Balard, O. Boissin, and J. Boulesteix, “A new digital ccd readout technique for ultra-low-noise ccds,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 115, no. 811, pp. 1068–1071, 2003. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/10.1086/377082>

- [7] G. Canelo, “The damic experiment,” International Workshop, 2014. [Online]. Available: <http://andeslab.org/workshop4/talks/Canelo-ANDES2014.pdf>
- [8] A. Aguilar-Arevalo, D. Amidei, X. Bertou, M. Butner, G. Canelo, A. Castañeda Vázquez, B. A. Cervantes Vergara, A. E. Chavarria, C. R. Chavez, J. R. T. de Mello Neto, J. C. D’Olivo, J. Estrada, G. Fernandez Moroni, R. Gaïor, Y. Guardincerri, K. P. Hernández Torres, F. Izraelevitch, A. Kavner, B. Kilminster, I. Lawson, A. Letessier-Selvon, J. Liao, V. B. B. Mello, J. Molina, J. R. Peña, P. Privitera, K. Ramanathan, Y. Sarkis, T. Schwarz, C. Sengul, M. Settimo, M. Sofo Haro, R. Thomas, J. Tiffenberg, E. Tiouchichine, D. Torres Machado, F. Trillaud, X. You, and J. Zhou, “Search for low-mass wimps in a 0.6 kg day exposure of the damic experiment at snolab,” *Phys. Rev. D*, vol. 94, p. 082006, Oct 2016. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.94.082006>
- [9] J. Barreto, H. Cease, H. Diehl, J. Estrada, B. Flaugher, N. Harrison, J. Jones, B. Kilminster, J. Molina, J. Smith, T. Schwarz, and A. Sonnenschein, “Direct search for low mass dark matter particles with ccds,” *Physics Letters B*, vol. 711, no. 3, pp. 264 – 269, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312003887>
- [10] A. Aguilar-Arevalo, X. Bertou, C. Bonifazi, M. Butner, G. Canelo, A. Castaneda Vazquez, B. Cervantes Vergara, C. R. Chavez, H. Da Motta, J. D’Olivo, J. Dos Anjos, J. Estrada, G. Fernandez Moroni, R. Ford, A. Foguel, K. P. Hernandez Torres, F. Izraelevitch, A. Kavner, B. Kilminster, and S. Wagner, “The connie experiment,” 08 2016.
- [11] J. Tiffenberg, “Damic tools tutorial,” Collaboration meeting talk, 2015.
- [12] CERN, “Root data analysis framework,” 2014. [Online]. Available: <https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/users-guide/ROOTUsersGuideA4.pdf>
- [13] B. M. Starr, N. Buchholz, G. Rahmer, J. Penegor, R. Schmidt, M. Warner, K. M. Merrill, C. F. Claver, Y. Ho, K. Chopra, E. Mondaca, C. Shroff, and D. Shroff, *MONSOON Image Acquisition System*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004, pp. 269–276. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/1-4020-2527-0_31
- [14] R. Rivera, “otsdaq brief overview,” OTS DAQ wiki server, 2016. [Online]. Available: <http://otsdaq.fnal.gov/docs/otsdaq-brief.overview.pdf>