

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

DETECCIÓN DE RADIACIÓN IONIZANTE UTILIZANDO SENSORES DE IMAGEN CMOS COMERCIALES

Ing. Martín Pérez
Maestrando

Dr. José Lipovetzky
Director

Dr. Juan Jerónimo Blostein
Co-director

Miembros del Jurado
Dr. Roberto Mayer (Instituto Balseiro)
Dr. Dario Sanz (Instituto Balseiro)
Ing. Roberto Cibils (INVAP)

24 de Septiembre de 2018

Laboratorio de Bajas Temperaturas – Centro Atómico Bariloche

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

A mis padres Norma y Hector
A mi hermana Laura

Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Resumen	ix
Abstract	xi
Agradecimientos	xiii
1. Introducción	1
1.1. Aplicaciones de los detectores de radiación ionizante	4
1.1.1. Dosimetría	5
1.1.2. Física Médica	6
1.1.3. Aplicaciones espaciales	7
1.1.4. Aplicaciones científicas	8
1.1.4.1. Detección de partículas cargadas	8
1.1.4.2. Detección de fotones	10
1.1.4.3. Detección de neutrones	11
1.2. Sumario del capítulo	11
2. Tecnologías de detección de radiación	13
2.1. Detectores de emulsión fotográfica	13
2.2. Detectores termoluminiscentes	15
2.3. Detectores gaseosos	17
2.3.1. Régimen de recombinación	18
2.3.2. Régimen de cámara de ionización	19
2.3.3. Régimen de contador proporcional	19
2.3.4. Régimen Geiger-Müller	20
2.4. Detectores Centelladores	21
2.5. Detectores semiconductores	22
2.5.1. Detectores semiconductores basados en junturas P-N	23
2.5.2. Detectores semiconductores CCD	25
2.6. Sumario del capítulo	27

3. Los sensores de imagen CMOS, principio de funcionamiento y primeras pruebas con radiación	29
3.1. La tecnología CMOS	29
3.2. Principio de funcionamiento de los sensores de imagen CMOS	33
3.3. Interacción de los <i>Active Pixel Sensor</i> y la radiación ionizante	37
3.4. Primeras pruebas con radiación	39
3.5. Sumario del capítulo	42
4. Implementación y desarrollo de la técnica de detección de radiación ionizante propuesta	43
4.1. Cámaras utilizadas	43
4.2. Esquema experimental	44
4.3. Descripción del software desarrollado para el análisis de eventos	47
4.4. <i>Fixed Pattern Noise</i> y corriente de oscuridad	51
4.4.1. Filtro autorregresivo implementado	53
4.4.2. Análisis de la distribución estadística del valor de los píxeles . .	55
4.5. Sumario del capítulo	57
5. Mediciones realizadas y análisis de resultados	59
5.1. Mediciones con fuentes de radiación alfa, beta, X y gamma	60
5.1.1. Análisis de los eventos registrados con diversas fuentes radioactivas	60
5.1.1.1. Partículas beta	61
5.1.1.2. Fotones X y Gamma	63
5.1.1.3. Partículas alfa	65
5.1.2. Análisis de colección de carga	66
5.1.3. Tamaño de los eventos registrados	69
5.2. Desempeño de los sensores como contadores de partículas	71
5.2.1. Análisis de la elección del umbral U_{ev}	72
5.2.2. Respuesta de los sensores a fotones gamma de fuentes de calibración de ^{137}Cs	73
5.2.3. Respuesta de los sensores a fotones gamma del Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6	74
5.3. Detección de eventos alfa en campos mixtos	76
5.4. Análisis del daño por radiación producido en los sensores	82
5.5. Sumario del capítulo	83
6. Implementación de un detector basado en un sensor CMOS y una FPGA	85
6.1. Sensor CMOS utilizado para el desarrollo	86

6.2. Placa de desarrollo utilizada para la lectura del sensor y la comunicación con la PC	89
6.3. El sistema desarrollado	89
6.4. Primeras pruebas con radiación	95
6.5. Sumario del capítulo	100
7. Conclusiones	101
Publicaciones asociadas a esta tesis	105
Bibliografía	107

Resumen

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de una técnica de detección de radiación ionizante basada en sensores de imagen comerciales con tecnología CMOS.

Los sensores de imagen CMOS basados en matrices de píxeles APS (*Active Pixel Sensor*) son dispositivos muy económicos, ampliamente utilizados en la industria electrónica de consumo masivo en cámaras de fotografía, teléfonos celulares, computadoras, etc. La técnica propuesta aprovecha el hecho que, al interactuar con el sensor, una partícula ionizante deposita carga en algunos de los píxeles que componen el volumen activo del sensor, observándose en ellos lecturas de mayor intensidad que en el resto de la imagen.

En este trabajo se estudia la respuesta de este tipo de sensores a diferentes tipos de radiación incidente; incluyendo partículas beta, fotones gamma, fotones de rayos X y partículas alfa. La técnica de detección desarrollada en este trabajo permite realizar detectores capaces de distinguir parcialmente partículas incidentes con diferentes poderes de frenado. Dicha diferenciación, se logra realizando un análisis de las imágenes capturadas por los sensores.

Haciendo uso de estos sensores, en el marco del presente trabajo, se han desarrollado detectores de radiación de bajo costo, con una resolución espacial que supera a la que poseen la mayoría de los detectores tradicionales y una alta resolución en dosis. Este nuevo tipo de detectores podría suplir y/o complementar a los sistemas de detección tradicionales utilizados en aplicaciones espaciales, dosimetría, protección radiológica, y monitoreo ambiental.

Palabras clave: DETECTORES DE RADIACIÓN, SENSORES DE IMAGEN CMOS, PARTÍCULAS ALFA, PARTÍCULAS BETA, RAYOS GAMMA, DOSIMETRÍA

Abstract

This work studies the detection of ionizing particles using low cost COTS CMOS image sensors.

Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) integrated circuits with Active Pixel Sensors (APS) arrays are widely used in Commercial Off The Shelf (COTS) cameras in consumer electronics, and have usually very low costs, in the range of few dollars. When a ionizing particle interacts with the sensor it loses energy generating ionization charge on a cluster of pixels, which can be observed as an illuminated region in the image.

This work studies the response of two COTS CMOS image sensors to different kinds of incident radiation; including beta particles, gamma photons, X-ray photons, and alpha particles; showing the possibility of partially identifying the type of incident particle through the pattern in the image and deposited charge.

With these sensors, inexpensive radiation detectors can be developed, with a high spatial and dose resolution. This new detection technique could supplement and/or complement traditional detection systems in space applications, dosimetry, radioprotection or area monitoring.

Keywords: RADIATION DETECTORS, CMOS IMAGE SENSORS, ALPHA PARTICLES, BETA RAYS, GAMMA RAYS, X-RAYS, DOSIMETRY.

Agradecimientos

A mi Director José Lipovetzky, por toda su generosidad, su apoyo, su paciencia y su dedicación para ayudarme a lograr este objetivo.

A mi Co-Director Jerónimo Blostein, su paciencia y sus valiosas observaciones.

A todos los integrantes del grupo de investigación: Fabricio Alcalde Bessia, Miguel Sofo Haro, Ivan Sidelnik, Mariano Gómez Berisso, y Aureliano Tartaglione.

A todo el *staff* del Laboratorio de Bajas Temperaturas, en especial a Hernán Pastoriza, Julio Guimpel, Gladys Nieva, René Cejas Bolecek, Santiago Hansen, Ignacio Artola, Pablo Cardenas, Pablo del Corro, y Nadim Morhell.

A todo el *staff* del Reactor RA6, en especial a Julio Marin, Izhar Levanon, Guillermo Fachini, Eduardo Scarnichia, Matías Fattori, Fabricio Brollo, Juan Longhino, y Soia Capararo.

Capítulo 1

Introducción

La detección de radiación ionizante tiene importantes aplicaciones en radioprotección, aplicaciones médicas, técnicas experimentales para el estudio de la materia condensada, aplicaciones industriales, seguridad en fronteras, vigilancia ambiental, etc. Los sistemas tradicionales para la detección de radiación ionizante están constituidos por tubos Geiger, cámaras de ionización, detectores de superficie, sistemas centelladores, fotomultiplicadores, etc. En general, estos sistemas ocupan grandes volúmenes, poseen costos elevados, y presentan consumos de potencia muy altos, estas desventajas reducen su campo de aplicación [1][2].

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una técnica de detección de radiación ionizante basada en sensores de imagen comerciales con tecnología CMOS [3][4][5]. Este tipo de sensores de imagen, que utilizan matrices de píxeles APS (*Active Pixel Sensor*) son ampliamente utilizados en la industria electrónica de consumo masivo en cámaras de fotografía, teléfonos celulares, computadoras, etc. Haciendo uso de estos sensores, en el marco del presente trabajo, se han desarrollado detectores de radiación de bajo costo, con una resolución espacial que supera a la que poseen la mayoría de los detectores tradicionales y una alta resolución en dosis [6]. La técnica propuesta aprovecha el hecho que, al interactuar con el sensor, una partícula ionizante deposita carga en algunos de los píxeles que componen el volumen activo del sensor, observándose en ellos lecturas de mayor intensidad que en el resto de la imagen. La técnica de detección desarrollada en este trabajo permite, además, realizar detectores capaces de distinguir parcialmente partículas incidentes con diferentes poderes de frenado. Dicha diferenciación, se logra realizando un análisis de las imágenes capturadas por los sensores. Este nuevo tipo de detectores podría suplir y/o complementar a los sistemas de detección tradicionales utilizados en algunas aplicaciones.

Diferentes trabajos han abordado el diseño de sensores de imagen para la detección de radiación ionizante. En los trabajos [6], [7], y [8], se presenta el diseño y el uso de una matriz de pixeles APS diseñada especialmente para el experimento ALICE del

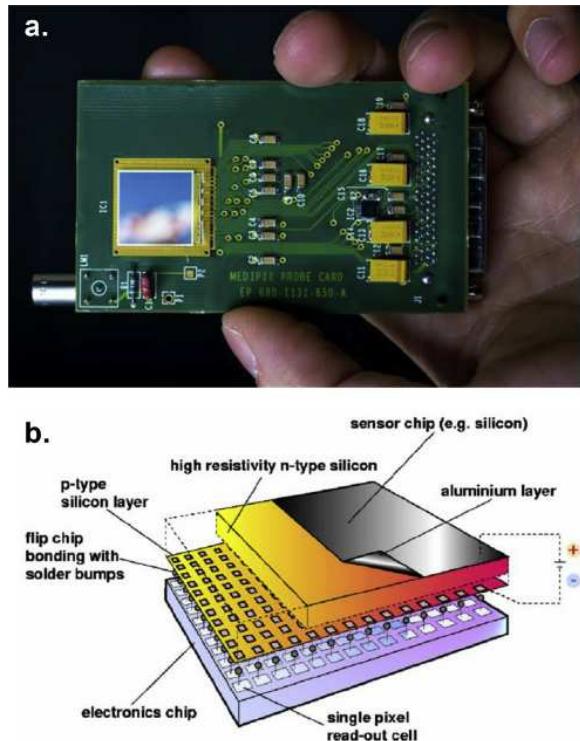


Figura 1.1: A)Fotografía del chip Medipix2. B)Esquema del diseño del chip Medipix2 [10].

CERN.

El trabajo [9] muestra el chip “Medipix2”, que es un detector híbrido especialmente diseñado para la detección de partículas de cargadas, en la Figura 1.1 a se muestra una imagen del mismo. El chip consta de dos capas de material semiconductor unidas entre sí mediante contactos metálicos (Figura 1.1 b). La capa superior contiene los píxeles que se utilizan para detectar la radiación, y puede estar construida con materiales como Si, GaAs, o CdTe. La capa inferior contiene los dispositivos electrónicos necesarios para el funcionamiento del sensor. Cuando la radiación incide sobre los píxeles genera portadores de carga, que son colectados por electrodos en la capa inferior. Los circuitos electrónicos de cada píxel amplifican la señal y comparan su amplitud con un nivel de discriminación pre-establecido. Luego, se incrementa un contador en el píxel correspondiente si la señal está por encima del nivel de discriminación. Los dispositivos Medipix contienen también un nivel de discriminación superior, por lo tanto, sólo las señales dentro de un rango de amplitud pueden ser aceptadas. Este tipo de detectores son capaces de proporcionar un factor de forma¹ (*Fill Factor*) del 100 %.

La referencia [11] describe un conjunto de detectores construido en un proceso CMOS de alta tensión. Dicho proceso permite aplicar muy alto voltaje para crear zonas de vaciamiento profundas en el chip. De esta forma, se puede colectar mayor

¹Se llama Factor de forma (*Fill Factor*) al cociente entre el área activa y el área total de un píxel en un sensor de imagen, este factor da una idea de cuánto porcentaje del sensor es sensible a la luz, o en este caso, a la radiación ionizante.

cantidad de carga que en los sensores convencionales. Los trabajos [12], [13], y [14] presentan el diseño y la fabricación de un detector llamado “MIMOSA” (*Minimun Ionising particle MOS Active pixel Sensor*) que utiliza una delgada capa epitaxial para mejorar la colección de carga. En un reciente trabajo se muestra que se pueden detectar neutrones térmicos y epitermicos con alta resolución espacial mediante el recubrimiento de un sensor de imagen CCD con una capa de conversión de boro [15].

En todos los trabajos mencionados anteriormente se muestra la fabricación de circuitos integrados especialmente diseñados para la detección de radiación ionizante. Por otra parte, sólo unos pocos trabajos han abordado el uso de sensores comerciales como detectores de partículas cargadas. En el trabajo [16] se estudia la respuesta de sensores de imagen comerciales CMOS para su utilización como detectores de rayos X. El mismo grupo presentó un estudio de la respuesta de los chips para el uso en dosimetría y para la detección de protones [17][18]. En [19], se propone el uso de cámaras de teléfonos celulares para detectar rayos cósmicos y se estudia la respuesta de los sensores con diferentes tipos de radiación. La idea de los autores es, mediante la masificación de su aplicación, lograr realizar un experimento a escala global donde el gran número de detectores permita un “área eficaz” de detección muy grande pese al pequeño tamaño de los detectores.

El uso de sensores comerciales tiene importantes ventajas con respecto a los circuitos integrados diseñados *ad hoc* para una aplicación específica. La principal ventaja es el bajo costo de cada chip, que en el caso de los sensores utilizados en este trabajo, ronda las decenas de dólares estadounidenses. La utilización de este tipo de dispositivos, junto con un adecuado procesamiento de los datos adquiridos, permitiría la fabricación de dosímetros personales económicos para la protección de los trabajadores en instalaciones nucleares, centros de imágenes médicas, y centros de radioterapia, no sólo en países desarrollados, sino también en el tercer mundo. Por otro lado, el bajo costo de este tipo de sensores vuelve accesible la construcción de arreglos de detectores que posean grandes superficies. Estos arreglos podrían servir para la caracterización de haces de radioterapia, para realizar neutrografías, como así también para realizar controles aduaneros. Los circuitos diseñados para aplicaciones especiales (ASIC), son difíciles de conseguir, y frecuentemente su acceso se encuentra restringido por regulaciones contra el tráfico internacional de armas, que pueden considerar a estas tecnologías relevantes desde un punto de vista de la seguridad y defensa. En cambio, los sensores de imagen comerciales están disponibles en el mercado y pueden ser fácilmente adquiridos. Por otra parte, el proceso de diseño de dispositivos basados en sensores comerciales es más simple, debido a que los mismos están bien documentados, y existe soporte de los fabricantes. Por esa razón, hay una tendencia a tratar de utilizar (siempre que sea posible) circuitos comerciales, un ejemplo de esta tendencia son las aplicaciones espaciales [20][21][22].

En este trabajo se estudia la respuesta de dos sensores de imagen CMOS a diferentes tipos de radiación ionizante; incluyendo partículas beta, fotones gamma, rayos X y partículas alfa. En este capítulo se realizará una descripción de algunas de las principales aplicaciones de la detección de radiación ionizante.

En el Capítulo 2 se describirán las técnicas tradicionales de detección de radiación, enumerando sus principales ventajas y desventajas. Luego, en el Capítulo 3 se describirán los conceptos básicos de la tecnología CMOS, el principio de funcionamiento de los sensores de imagen, y los fenómenos físicos presentes durante la interacción de los APS y la radiación ionizante. Hacia el final del Capítulo 3 se mostrarán los resultados de las primeras pruebas con radiación.

En el Capítulo 4 se describirá la técnica de detección de radiación propuesta. En primer lugar, se realizará una descripción de las cámaras empleadas para el desarrollo del proyecto, el esquema experimental utilizado para realizar las mediciones y el funcionamiento del *software* desarrollado. Para finalizar el capítulo, se describirán las fuentes de ruido presentes en los sensores, el filtro autorregresivo desarrollado para mitigar su efecto, y el análisis realizado para verificar el correcto funcionamiento del filtro propuesto.

En el Capítulo 5 se describirán las mediciones realizadas con diferentes fuentes radioactivas y se mostrarán los resultados obtenidos. Se realizará un análisis de la forma, el radio, y la carga colectada en los eventos registrados. Luego, se mostrarán los resultados de los experimentos realizados en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor de investigación RA6 y de los realizados empleando dos fuentes de calibración de ^{137}Cs . En estas mediciones se buscó realizar una calibración de los sensores y relacionar la dosis recibida con el número de eventos registrados. Para finalizar el capítulo, se muestran los resultados de una irradiación realizada con un campo mixto ($\alpha + \gamma$) en el que se buscó comprobar la capacidad del *software* diseñado para detectar partículas alfa en presencia de campos mixtos.

En el Capítulo 6 se presentará la primera versión de un detector de radiación ionizante basado en un sensor de imagen CMOS y una FPGA, y se mostrarán los resultados obtenidos en las primeras pruebas realizadas con radiación. Por último, en el Capítulo 7 se presentarán las conclusiones generales del trabajo y se enumerarán los pasos a seguir en el desarrollo de la técnica de detección basada en sensores de imagen CMOS.

1.1. Aplicaciones de los detectores de radiación ionizante

La detección de radiación directamente ionizante (radiación formada por partículas cargadas que interactúan de forma directa con los electrones y el núcleo de los áto-

mos de las moléculas ionizándolos) o de radiación que no es directamente ionizante (como los fotones, los neutrinos o los neutrones, que al atravesar la materia pueden interactuar con ella produciendo partículas cargadas que ionizan a otros átomos) es de suma importancia en aplicaciones como dosimetría; medicina nuclear y diagnóstico por imágenes; aplicaciones espaciales; en neutrógrafía para realizar ensayos no destructivos y tomar imágenes de materiales o piezas; en investigación aplicada para caracterizar haces de radiación; en experimentos de física de partículas o aplicaciones de haces de partículas, etc. [23] En esta sección se describirán algunas de las principales aplicaciones de los detectores de radiación ionizante comenzando por la aplicaciones relacionadas con la dosimetría y la física médica. Luego, se describirán las aplicaciones espaciales, y por último se enumerarán algunas de las aplicaciones de la detección de partículas cargadas, fotones y neutrones.

1.1.1. Dosimetría

Existen numerosos entornos laborales como reactores nucleares, centros de radioterapia, centros de medicina nuclear en los que las personas pueden estar expuestas a radiación ionizante. La interacción de partículas ionizantes con el cuerpo humano puede de originar daños en tejidos biológicos, y a largo plazo aumentar el riesgo de contraer cáncer. La gravedad de las lesiones o el aumento de riesgo de contraer cáncer aumenta con la cantidad de energía promedio absorbida por unidad de masa, esta cantidad es llamada dosis. La dosimetría es la rama de la radiología que estudia la dosis que absorben los tejidos biológicos y la materia en general, como consecuencia de la exposición a radiación ionizante [23].

Existen muchas unidades de medida que están relacionadas con la cantidad de dosis recibida: El gray (Gy) es una unidad que mide la dosis absorbida por un determinado material, es equivalente a la absorción de un julio (J) de energía ionizante por un kilogramo de material irradiado. Puede utilizarse para cualquier tipo de radiación, y para cualquier material. El Sievert (Sv) es una unidad que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los posibles efectos biológicos producidos. Un Sievert es equivalente a un julio sobre kilogramo ($J \cdot kg^{-1}$). Otra de las unidades que se utilizan para medir la dosis de radiación absorbida es el rad, que equivale a $1 \text{ erg} \cdot g^{-1}$. Estas unidades dan un valor numérico con el que se pueden cuantificar los efectos producidos por las radiaciones ionizantes.

Los instrumentos utilizados para efectuar la medición de dosis se denominan dosímetros y pueden estar basados en diversas tecnologías, como se verá en el Capítulo 2. En la Figura 1.2 se muestra la imagen de un dosímetro personal. Se puede hacer una clasificación de las diferentes ramas dentro de la dosimetría dependiendo de su campo de aplicación:



Figura 1.2: Dosímetro personal [24].

- **Dosimetría personal:** Esta rama se encarga de determinar la tasa de dosis recibida por personas expuestas a radiaciones ionizantes en función de su trabajo. Su finalidad es monitorear el riesgo radiológico y garantizar que los trabajadores de forma individual cumplan con las legislaciones vigentes, contribuyendo por lo tanto a proteger su salud en relación con los posibles efectos biológicos.
- **Dosimetría ambiental:** Es la rama que se encarga de la medición de radiación en ambientes de trabajo en donde se desea evaluar el riesgo radiológico. Su finalidad es la vigilancia y monitoreo del riesgo radiológico en puestos y procedimientos de trabajo, así como también en situaciones especiales que pueden ser consideradas de riesgo.
- **Dosimetría clínica:** Es la rama de la dosimetría que se encarga de la medición de las dosis de pacientes que son sometidos a algún tratamiento médico. En medicina nuclear se estudia la dosis de radiación absorbida por los distintos órganos de interés en aquellos pacientes sometidos a diagnóstico o tratamiento con radioisótopos. En radiodiagnóstico son de importancia las tasas de dosis recibidas por pacientes sometidos a exploraciones diagnósticas con rayos X. En radioterapia se calcula la dosis absorbida por el paciente en tratamientos oncológicos, de esta forma se puede conocer la cantidad de radiación absorbida por el volumen tumoral, así como también por el tejido vecino sano del paciente sometido al tratamiento.

1.1.2. Física Médica

La radioterapia es un tipo de tratamiento oncológico que utiliza radiación (por lo general X o gamma) para eliminar células tumorales. Este tipo de tratamiento actúa

sobre el tumor, destruyendo las células malignas y así impide que crezcan y se reproduzcan. Esta acción también puede ejercerse sobre los tejidos normales; sin embargo, los tejidos tumorales son más sensibles a la radiación y no pueden reparar el daño producido de forma tan eficiente como lo hace el tejido normal, de manera que son destruidos bloqueando el ciclo celular [25].

Los rayos gamma utilizados para los tratamientos pueden ser obtenidos de fuentes radiactivas como el ^{60}Co . La desventaja de este tipo de radiación es que deposita la mayor parte de su energía cerca de la superficie del tejido. Para reducir la dosis superficial y optimizar el tratamiento de tumores se requiere la rotación de la fuente o el paciente de manera que la dosis en la superficie se distribuya en un volumen mayor.

Por el contrario, los protones e iones pesados depositan la mayor parte de su energía cerca del final de su trayectoria (pico de Bragg). La pérdida de energía en el pico de Bragg es varias veces mayor a la dosis superficial y depende de la energía de las partículas. Otras técnicas de tratamiento de tumores utilizan piones negativos que también depositan su energía en el final de su trayectoria. Además, los tumores pueden ser tratados también con neutrones. En todos los casos es de vital importancia monitorear los niveles de radiación recibida por los pacientes para aumentar la eficacia de los tratamientos y proteger su salud evitando que reciban dosis mayores o menores a las necesarias. Una dosis baja en un tumor puede originar que las células cancerígenas no mueran, haciendo que el tratamiento sea ineficiente [26].

1.1.3. Aplicaciones espaciales

Fuera de la atmósfera terrestre existen niveles de radiación significativamente mayores a los que se observan a nivel terrestre. La radiación espacial es diferente a la que se puede encontrar en la superficie de la Tierra. En el espacio la radiación está compuesta por partículas atrapadas en el campo magnético de la tierra, partículas generadas durante tormentas solares, y rayos cósmicos que son protones e iones pesados de alta energía. Este tipo de partículas posee tanta energía que literalmente puede extraer a los electrones de cualquier átomo. Es por eso que puede dañar a las células humanas, dando lugar a problemas de salud tales como cataratas, cáncer y daños en el sistema nervioso central.

Ante igual dosis, los efectos producidos por la radiación espacial en el ADN humano, los tejidos, y las células son distintos a los originados por la radiación presente en la tierra. Esto se debe a la gran cantidad de ionización que se produce en los lugares cercanos a las trayectorias de las partículas. Es muy difícil predecir los efectos a largo plazo de la radiación espacial en el cuerpo humano, especialmente en los astronautas que pasan muchos meses en órbita. Debido a esta incertidumbre, las agencias espaciales de diferentes países están financiando investigaciones para determinar la cantidad de

radiación en el espacio y la magnitud del daño que puede causar. De esta forma se podrán entender los riesgos a los que se enfrentan las personas que viven en el espacio [27].

El estudio de la radiación presente en el espacio también es importante debido a que los componentes electrónicos pueden sufrir fallas cuando son expuestos a partículas con altas energías. Es por este motivo que durante años las agencias espaciales de diversos países han realizado experimentos para monitorizar la radiación espacial y estudiar los efectos en dispositivos electrónicos. Principalmente se estudian la degradación de los componentes ocasionada por dosis total, y los errores de funcionamiento o *Single Event Effects* originados por la interacción entre las partículas cargadas y los semiconductores. Generalmente se evalúan circuitos integrados como: memorias, dispositivos de potencia, optoelectrónica, etc. Se busca colectar información para validar los datos obtenidos en las irradiaciones realizadas en tierra y para testear el diseño de los procedimientos de corrección de errores [28].

Otra aplicación frecuente en el espacio, es el monitoreo de los niveles de radiación para condicionar la operación de ciertos equipos electrónicos o funciones. En algunos equipos dentro de satélites el daño producido por radiación disminuye considerablemente cuando se encuentran apagados. De esta forma, cuando existen niveles altos de radiación, se desconectan ciertos equipos para prolongar su vida útil.

1.1.4. Aplicaciones científicas

Una de las primeras aplicaciones científicas de los detectores de radiación fue la observación de partículas emitidas por materiales radiactivos [29]. Luego, se los comenzó a utilizar en experimentos de física nuclear y en la detección de rayos cósmicos. A través del tiempo el rango de usos para este tipo de instrumentos ha crecido considerablemente. En la actualidad se emplean para detectar, rastrear y/o identificar partículas de alta energía, producidas por la desintegración nuclear, la radiación cósmica, o reacciones en aceleradores de partículas. Los detectores de radiación también pueden ser utilizados para medir distintos atributos de las partículas tales como el impulso, *spin*, carga etc. Cabe destacar que este tipo de detectores no sólo se utilizan para el estudio de la naturaleza de las partículas en sí mismas, también se emplean en experimentos en los que las partículas sirven para analizar las propiedades de otros objetos [30]. A continuación se mencionarán algunas de las aplicaciones científicas de los detectores de radiación.

1.1.4.1. Detección de partículas cargadas

La detección e identificación de partículas cargadas es de fundamental importancia en el campo de la Física Nuclear y de partículas elementales. En Física Nuclear y

en sus aplicaciones se utilizan detectores de radiación como contadores de partículas para conocer la actividad de elementos radioactivos. Se emplean detectores de trazas para medir longitudes medias de integración o desintegración e inferir vidas medias y secciones eficaces de interacción. En muchos experimentos es necesario realizar espectrometrías α y β , así como también identificar partículas realizando mediciones de su masa, carga y momento [31]. En física de partículas elementales la mayoría de las partículas tiene carga unitaria. Pero en el estudio, por ejemplo, de la composición química de los rayos cósmicos primarios deben distinguirse cargas diferentes.

Entre otras aplicaciones de la detección de partículas cargadas se pueden nombrar:

- **Método de radiocarbono:** Una de las aplicaciones de la detección de partículas cargadas es la determinación de la edad de objetos arqueológicos con componentes de origen biológico por el método de radiocarbono. La radiación cósmica que incide sobre el dióxido de carbono presente en la atmósfera terrestre produce la reacción nuclear:



El ${}^{14}C$ es un radioisótopo que emite partículas β y tiene una vida media de 5730 años. El proceso de fotosíntesis incorpora el átomo radiactivo de carbono a las plantas de manera que la proporción ${}^{14}C/{}^{12}C$ en estas es similar a la atmosférica. Los animales incorporan, por ingestión, el carbono de las plantas, por lo que la proporción también es similar. Tras la muerte de un organismo vivo no se incorporan nuevos átomos de ${}^{14}C$ a los tejidos y la concentración del isótopo ${}^{14}C$ va decreciendo conforme va transformándose en ${}^{12}N$ por decaimiento radiactivo. Luego, la edad de una pieza arqueológica puede ser determinada si se compara la actividad de ${}^{14}C$ con el valor de equilibrio de la actualidad. Actualmente se emplean básicamente tres técnicas diferentes para medir el contenido de radiocarbono en una muestra: utilizando contadores proporcionales; con centelladores líquidos; y mediante espectrometría de masas con acelerador de partículas. En el primer caso, el carbono obtenido en la muestra se convierte en CO_2 y se introduce en un contador proporcional de gas, que mide el número de desintegraciones producidas en la muestra. En el método en el que se utilizan centelladores líquidos, la muestra se disuelve en benceno y se le añade un líquido que centellea cuando se produce una desintegración. La espectrometría de masas con acelerador de partículas es el método más moderno. En ella, la muestra es ionizada e introducida en un acelerador de partículas. El haz resultante es desviado por potentes campos magnéticos. Dado que cada isótopo de carbono tiene una masa diferente, el ángulo de deflexión es ligeramente diferente para cada uno y es posible medir

las concentraciones relativas de cada uno de ellos. Al no depender de la actividad de la muestra y ser insensible a la radiactividad natural, con este método se pueden conseguir las medidas de mayor calidad [26][32][33].

- **Tomografías con Muones:** es una técnica que utiliza muones cósmicos para generar imágenes tridimensionales realizando experimentos de transmisión. Debido a que los muones penetran más profundamente que los rayos X, las tomografías con muones se pueden utilizar para tomar imágenes a través de objetos con mucho mas espesor que con radiografías. El flujo de muones en la superficie de la Tierra es tal que un solo muón pasa a través de un área del tamaño de una mano humana por segundo. Desde su desarrollo en los años 1950, la tomografía con muones ha tenido muchas variantes, las más importantes son las radiografías basadas en transmisión de muones y las tomografías basadas en el *scattering* de muones [26].

1.1.4.2. Detección de fotones

Los instrumentos para medir rayos X y rayos γ son herramientas clave en la astronomía y la astrofísica moderna. El rango de energías de los fotones detectados puede ser de 13 ordenes de magnitud, desde rayos X de 100 eV a partículas cercanas al espectro de rayos cósmicos de aproximadamente 10^{15} eV. La instrumentación requerida varía en gran medida dependiendo de la energía y del tipo de radiación que se desea observar [2]. Entre las aplicaciones más importantes de la detección de fotones se pueden encontrar:

- **Radiografía y gammagrafía:** La obtención de imágenes por medio de rayos X o γ se basa en la absorción de la radiación específica en una parte de un cuerpo o un material. Si se usan rayos X, la imagen obtenida es esencialmente una sombra registrada por una película sensible o cualquier otro detector sensible a la posición. Los rayos X son adecuados para la obtención de imágenes útiles para diagnósticos médicos, así como también para el estudio del estado de materiales. Existe otra técnica para estudiar el funcionamiento de órganos del cuerpo humano, en la que el paciente es inyectado con trazadores radiactivos. Estos radionúcleidos, adecuadamente integrados en alguna molécula se depositan en el órgano de interés. Luego, mediante la detección de la radiación γ emitida por los radionucleidos se puede obtener una imagen [26]. En la industria metalúrgica se utilizan también fuentes de fotones gamma para hacer controles de calidad en soldaduras, o analizar el estado de piezas mecánicas.
- **Identificación de isótopos radiactivos:** Observando los picos del espectro de rayos γ emitidos por una muestra se puede determinar cuantitativamente algunos de los radionucleidos que contiene. La radioactividad medida puede ser

natural, o artificialmente generada por neutrones, protones o fotones. Para esta aplicación frecuentemente se utilizan detectores semiconductores de germanio de alta resolución [2].

- **Tribología:** La tribología estudia el diseño, la fricción, el desgaste y la lubricación de superficies que interactúan en movimiento, por ejemplo, cojinetes o engranajes. En la radio-tribología una pieza sometida al desgaste o la fricción se recubre con un material radiactivo. Luego, midiendo los niveles de actividad en los componentes se puede inferir el grado de desgaste de los mismos.

1.1.4.3. Detección de neutrones

Antiguamente la detección de neutrones era sólo un pequeño nicho dentro de la detección de radiación, pero durante las últimas décadas, su importancia ha crecido considerablemente. Varios campos relacionados directa o indirectamente con neutrones se han extendido o desarrollado recientemente. En la actualidad existe un gran número de instalaciones de investigación en donde resulta imprescindible la medición de neutrones. Diversas cuestiones de seguridad nuclear han generado una gran cantidad de actividades en donde se utilizan técnicas de detección de radiación y en particular de neutrones. La detección de neutrones también se utiliza en la búsqueda de materiales nucleares ilícitos, en el control de fronteras, y en la supervisión de accesos [2].

Otro campo de aplicación de la detección de neutrones es la técnica de neutrografía, que es similar a la radiografía y surgió en la década de 1950. La principal diferencia entre ambas técnicas es el tipo de radiación que se utiliza para obtener las imágenes. En radiografía las muestras son irradiadas con rayos X o gamma y la imagen se visualiza digitalmente o se obtiene procesando un film. En neutrografía la muestra es colocada entre una fuente de neutrones y un detector, el haz de neutrones que emite la fuente interactúa con la muestra y se modifica, si se mide la distribución espacial del haz transmitido se puede obtener una imagen. Algunas de sus principales aplicaciones son: mediciones y ensayos no destructivos de materiales, análisis de combustibles nucleares, exámenes de materiales compuestos en arqueología, objetos de arte, diagnóstico de componentes aeronáuticos, investigaciones relacionadas con la porosidad de rocas y sedimentos, medición de densidades, etc.

1.2. Sumario del capítulo

En este capítulo se presentaron algunas de las principales aplicaciones de la detección de radiación ionizante. El rango de usos es muy amplio, y abarca muchas disciplinas como la física, la medicina, la ingeniería, la arqueología, entre otras. En algunos casos como en la dosimetría y la física médica la medición y cuantificación de las dosis de

radiación adquiere suma importancia debido a que de ella depende la salud de trabajadores y pacientes. Como se pudo observar en la Sección 1.1.4, existen aplicaciones para la detección de fotones, partículas cargadas, y de neutrones. Es de esperar que con los nuevos avances tecnológicos surjan nuevos usos para la detección de este tipo de radiación.

Capítulo 2

Tecnologías de detección de radiación

En esta sección se presentarán las principales tecnologías utilizadas para la detección de radiación ionizante. Se comenzará con una descripción de las tecnologías de detectores de emulsión fotográfica y termoluminiscentes que son las más utilizadas en dosimetría personal. Luego, se describirán los detectores gaseosos, centelladores y semiconductores que son los más utilizados en aplicaciones científicas y dosimetría ambiental, señalando en todos los casos las ventajas y desventajas de cada tecnología.

2.1. Detectores de emulsión fotográfica

Los detectores de emulsión fotográfica se basan en la transformación que sufre el bromuro de plata cuando es expuesto a radiación ionizante, al igual que los dosímetros TLD permiten conocer la dosis total recibida por una persona en un periodo de tiempo. Están formados por un soporte translúcido de vidrio o celuloide en donde se coloca un medio gelatinoso que posee granos microscópicos de bromuro de plata distribuidos uniformemente.

Los electrones liberados por la radiación ionizante neutralizan al ion Ag^+ transformándolo en plata metálica. La cantidad de granos de bromuro que han sufrido esta transformación, así como el número de iones plata convertidos en cada grano, es función de la dosis absorbida. Para realizar la lectura de este tipo de detectores se realiza un proceso que consta de un revelado, un baño para detención del revelado y un tratamiento de fijado. Por último, se realiza un lavado con agua para eliminar los compuestos químicos residuales de ambos procesos y se seca la emulsión. Una vez finalizados los procesos químicos se observan en ella distintas tonalidades de grises (ennegrecimiento) que son proporcionales a la dosis recibida.

Para determinar la magnitud de radiación absorbida se mide la densidad óptica

(D_{opt}) , que es la atenuación luminosa causada por la emulsión y que se calcula con la siguiente formula:

$$D_{opt} = \log \frac{I_0}{I} \quad (2.1)$$

En donde I_0 es la intensidad de luz incidente e I es la cantidad de luz que logra atravesar la emulsión. En la Figura 2.1 se muestra la curva de respuesta característica de la densidad óptica en función de la dosis, como se puede ver la respuesta es de forma sigmoidea. A dosis nula existe un ennegrecimiento de base (fog) que aumenta con el envejecimiento de la emulsión fotográfica. Luego le sigue un intervalo de dosis con muy baja sensibilidad, continuada por una zona de pendiente pronunciada, pasando a una zona de respuesta prácticamente lineal. Para dosis mayores se observa una disminución de la densidad óptica por intervalo de dosis seguido de la zona final de saturación a altas dosis. Para aumentar el rango de dosis que puede detectar este tipo de dosímetro se utilizan simultáneamente dos emulsiones que poseen distintas sensibilidades [1][23][34].

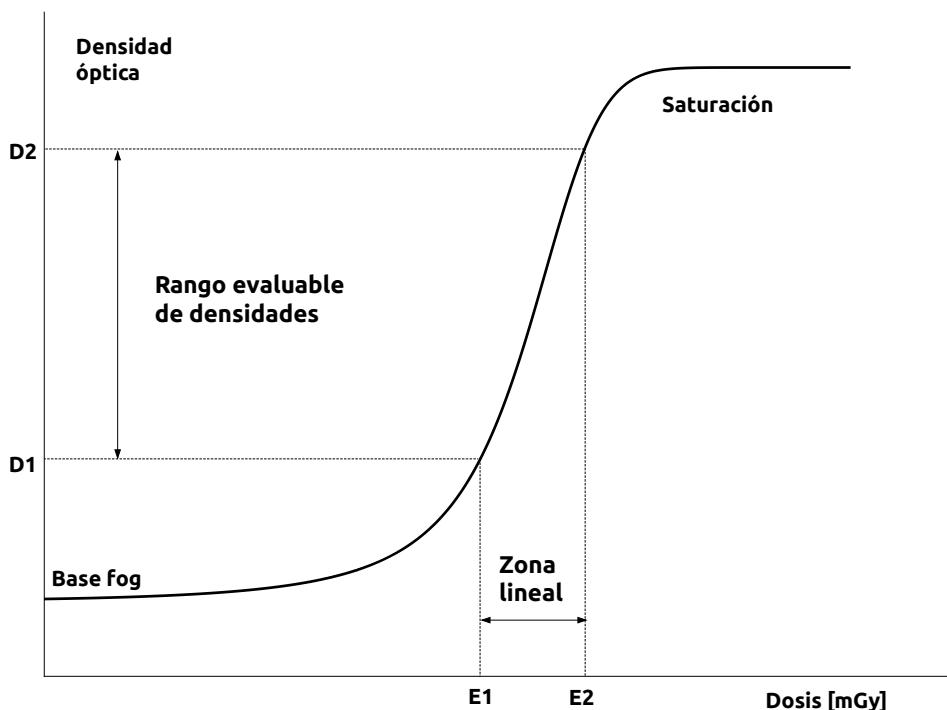


Figura 2.1: Gráfico de densidad óptica en función de la dosis recibida [35].

Algunas de las ventajas de este tipo de detectores son:

- Buena resolución espacial, en la práctica está limitada por la capacidad del elemento utilizado para analizar el film.
- Poseen pequeñas dimensiones.
- Si se utilizan en el rango de dosis adecuado su respuesta es lineal.

- La información de la dosis no se pierde cuando el detector es leído.

Algunas de las desventajas de este tipo de detectores son:

- Los datos obtenidos dependen de la temperatura del baño de revelado. Si existen variaciones en el revelado la lectura de la dosis sufrirá modificaciones.
- Cuando la emulsión fotográfica es sometida a una combinación de alta humedad y temperatura se produce una perdida de información llamada *fading*.

2.2. Detectores termoluminiscentes

Los detectores termoluminiscentes (TLD) son ampliamente utilizados en dosimetría personal, permiten conocer la dosis total recibida por una persona en un periodo de tiempo. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de luminiscencia que se produce en ciertos materiales dieléctricos o semiconductores, estos materiales emiten luz cuando son excitados en determinadas condiciones.

En una red cristalina inorgánica perfecta existen bandas de energía “permitidas” que pueden ser ocupadas por electrones y se encuentran separadas por las denominadas bandas “prohibidas” que no pueden albergar electrones. La última banda de energía que se encuentra totalmente completa con electrones es denominada “banda de valencia” y está separada por varios eV de la banda “de conducción”. En los materiales semiconductores utilizados para la fabricación de estos dosímetros (LiF:Ti,Mg; LiF:Na,Mg; LiF:Mg,Cu,P; entre otros) la banda de conducción se encuentra semi-vacía [1][23][34].

Cuando la radiación ionizante interactúa con estas redes cristalinas de estos semiconductores, algunos electrones que se encuentran en la banda de valencia son excitados y pasan a la banda de conducción convirtiéndose en electrones libres. A su vez, cuando este fenómeno sucede se generan huecos (ausencia de electrones) en la banda de valencia. A los electrones libres y a los huecos se los denomina “portadores de carga”.

En un cristal real la banda prohibida contiene un conjunto discreto de niveles metastables aceptores y donores denominados “trampas”. Estos niveles son generados por las imperfecciones intrínsecas del material o por la presencia de impurezas llamadas activadores. La mayoría de los electrones que son excitados por radiación ionizante vuelven a su estado fundamental y se recombinan con huecos, sólo en algunos casos se produce emisión de luz visible o cercana al visible. Por otra parte, una fracción de los portadores generados queda atrapada en las trampas por un periodo de tiempo que puede ser muy elevado, y que depende de los niveles de energía en los que se encuentran dichas trampas. El número de electrones y huecos que pueden quedar atrapados en las trampas es proporcional a la dosis recibida [1][23][34].

Cuando se aumenta la temperatura del cristal los electrones y los huecos se liberan volviendo a su estado natural y pierden el exceso de energía que habían adquirido emitiendo fotones. La temperatura a la cual se liberan los portadores de una trampa es función del nivel de energía de dicha trampa. Si se aumenta la temperatura del cristal en forma gradual y se miden los fotones que emite el cristal se obtiene una curva de emisión de luz en función de temperatura, esta curva se denomina “curva glow”. En la Figura 2.2 se puede observar un conjunto de “curvas glow” en los que se ven los picos de emisión de luz que corresponden a electrones capturados en diferentes trampas para diferentes tasas de dosis en un TLD de $K_3Na(SO_4)_2$.

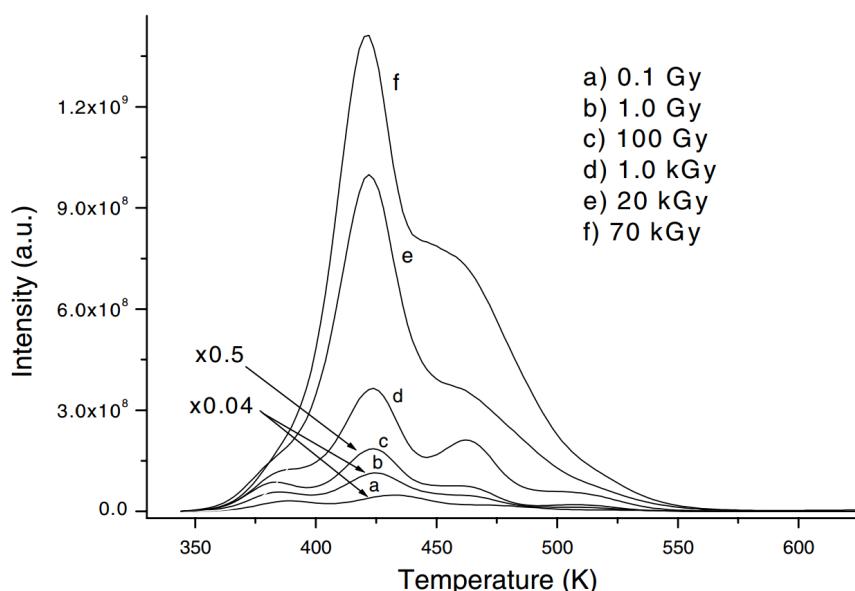


Figura 2.2: Curvas de termoluminiscencia de un TLD de $K_3Na(SO_4)_2$ nanocrystalino en polvo expuesto a diversas dosis de rayos gamma de una fuente de ^{60}Co . La ordenada debe ser multiplicada por los números en las curvas para conseguir las intensidades relativas [36].

Por lo general los dosímetros TLD son leídos en condiciones normales tras un mes de trabajo. El dispositivo de lectura consiste en un microhorno, un sistema óptico y un fotomultiplicador. Los TLD son calentados en una atmósfera inerte dentro del microhorno, luego en el sistema óptico la luz emitida es filtrada y focalizada en el photocatodo del fotomultiplicador, por último se integra la cantidad de carga generada o se cuenta la cantidad de fotones emitidos para conocer la dosis acumulada.

Algunas de las ventajas de los dosímetros TLD son:

- Son de pequeñas dimensiones.
- El número atómico de la mayoría de los detectores es similar al del tejido humano. Por lo tanto, se puede conocer de forma sencilla las dosis equivalentes en tejido.
- Pueden ser utilizados en un amplio rango de dosis: $10 \mu\text{Gy} - 100 \text{kGy}$.

- Pueden ser utilizados docenas o cientos de veces con sólo pequeños cambios en su eficiencia.
- La eficiencia termoluminiscente es independiente de la tasa de dosis.
- Son sensibles a la mayoría de los tipos de radiación ionizante, y se puede realizar una discriminación en campos mixtos tales como beta-gamma o neutrón-gamma.

Algunas de las desventajas de este tipo de dosímetros son:

- No se puede conocer la dosis recibida en forma inmediata.
- Si existe alguna falla durante el proceso de lectura del dosímetro no puede ser leído nuevamente y se pierde la información acumulada.
- Los cambios en la transmisión luminosa debido a ralladuras en la superficie de los dosímetros, la contaminación, y la absorción gaseosa pueden alterar la eficiencia intrínseca o dar lugar a señales no inducidas por radiación.
- La sensibilidad de los dosímetros puede aumentar o disminuir después de recibir una dosis grande de radiación.

2.3. Detectores gaseosos

Los detectores gaseosos son ampliamente usados en dosimetría, aplicaciones científicas y en la industria nuclear. Están formados por un recinto lleno con un gas a presión que posee dos electrodos separados a una cierta distancia. La Figura 2.3 muestra el esquema de un detector gaseoso.

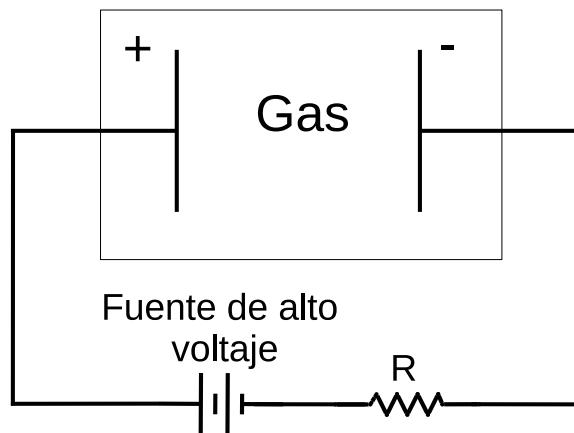


Figura 2.3: Esquema de un detector gaseoso.

Los electrodos son alimentados con un voltaje de polarización V_p y no circula corriente entre ambos debido a que el gas no es conductor. Cuando una partícula incide

sobre el detector produce una ionización en el gas, y se generan pares ion-electrón. El campo eléctrico aplicado dentro del recinto acelera a las cargas y hace que se desplacen hacia los electrodos. En su trayecto, los iones y electrones (si alcanzan la energía cinética suficiente) pueden a su vez producir nuevas ionizaciones, o bien si el campo eléctrico no es suficiente se pueden producir recombinaciones (neutralizarse). La magnitud de estos efectos depende del tipo de gas con el que está construido el detector, del voltaje V_p y del tamaño del recinto.

Generalmente se utiliza una mezcla de un gas orgánico que cede electrones y un gas inerte como el Argón para evitar la degradación. Para la detección de neutrones térmicos los gases más utilizados son ^3He o $^{10}\text{BF}_3$. Esto se debe a la gran sección eficaz de captura de neutrones térmicos por parte de los núcleos de ^3He y ^{10}B . La geometría más utilizada es la de un cilindro metálico con un alambre central. Se aplica un alto voltaje positivo al alambre, convirtiéndose éste en ánodo y el cilindro en cátodo. Se busca que las paredes del recinto sean tan delgadas como sea posible para que las mismas no interfieran con la radiación incidente. En el caso de los detectores de neutrones el ancho de las paredes no es un parámetro critico, por lo que no se las hace muy delgadas para no perder robustez. Si se desea realizar mediciones de partículas con bajo rango de penetración (α o β) se deben utilizar recintos con ventanas de un material y espesor apropiado que permitan que tales partículas puedan interactuar con el gas del detector.

Se puede leer la información obtenida en dos modalidades distintas de trabajo: midiendo la corriente eléctrica promedio que se genera en los electrodos (modo corriente) o contando la cantidad de pulsos de corriente generados (modo pulso). Los detectores gaseosos pueden ser utilizados en diferentes regímenes de operación dependiendo de la tensión de polarización que se aplique a los electrodos. Estos regímenes son: Recombinación, cámara de ionización, contador proporcional y Geiger Müller. En la Figura 2.4 se muestra un gráfico de cantidad de iones colectados en función del voltaje V_p , en el mismo se pueden apreciar las diferentes regímenes de operación que se explicarán a continuación [1][34].

2.3.1. Régimen de recombina

Cuando el voltaje aplicado a los electrodos está por debajo de un cierto umbral no todas las cargas generadas logran llegar a los electrodos. Esto se debe a que el campo eléctrico aplicado es pequeño y se producen recombinaciones dentro del recinto. Es por eso que no es recomendable utilizar a este tipo de detectores en este rango de voltajes (zona de recombina) debido a que se pierde información.

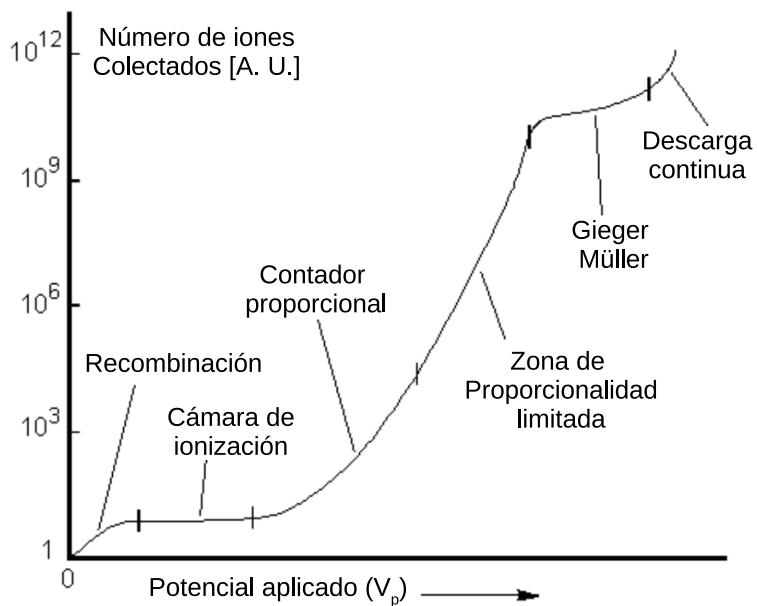


Figura 2.4: Regímenes de operación de un detector gaseoso [1].

2.3.2. Régimen de cámara de ionización

Cuando se aplica un voltaje de polarización mayor se ingresa a la zona de cámara de ionización. En esta zona no existe recombinación ni ionización secundaria, por este motivo la cantidad de iones que llegan a los electrodos es la producida por la radiación. Si se modifica la tensión V_p no se registran variaciones en la cantidad de iones generados.

Se las puede operar en modo pulso, registrándose un pulso eléctrico por cada evento ionizante. Sin embargo, las cámaras de ionización también pueden emplearse en modo corriente para la determinación de la intensidad de campos de radiación. En este modo de operación el dispositivo entrega un flujo de carga proporcional al número de eventos ionizantes ocurridos en el lapso de resolución temporal de la cámara. Las corrientes generadas en este régimen son tan pequeñas que se deben utilizar amplificadores muy sensibles para medirlas.

2.3.3. Régimen de contador proporcional

En la región llamada proporcional, la carga colectada aumenta al incrementarse el voltaje. Esto se debe a que los iones iniciales (primarios) se aceleran dentro del campo eléctrico pudiendo, a su vez, crear nuevos pares de iones (efecto de multiplicación).

Los pulsos producidos en este régimen son de mayor amplitud que los producidos en la región de cámara de ionización. Por este motivo, se suele polarizar a los detectores en este régimen para realizar cuenta de eventos. En el caso de los detectores de neutrones, la energía liberada está dada por la reacción nuclear que se produce entre el neutrón incidente y el gas, por lo tanto no es posible realizar espectrometría por altura de pulso. Para otros tipos de radiación se suele utilizar este régimen para realizar espectrometría,

debido a que la amplitud de los pulsos generados es proporcional a V_p y a la energía depositada por las partículas. Aumentando aún más el voltaje V_p , se llega a la región de proporcionalidad limitada. En esta región la multiplicación gaseosa es mayor para la radiación que genera menos ionización en el gas. Es por este motivo que no se utiliza a los detectores en este rango de voltajes.

2.3.4. Régimen Geiger-Müller

Si se continúa aumentando la tensión de polarización se llega a la región llamada Geiger Müller. En esta zona el campo eléctrico es muy intenso y la producción de un sólo par ión-electrón (por ionización primaria) provoca una avalancha de ionizaciones secundarias. Este fenómeno es independiente de la energía y naturaleza de la partícula.

La amplitud de los pulsos producidos en este régimen es elevada, esto se debe a la gran cantidad de corriente eléctrica que se genera con cada partícula incidente. Los picos de los impulsos producidos pueden llegar a tener decenas de Volts, por lo que se puede activar directamente sistemas electrónicos de registro, sin necesidad de amplificación previa. En este régimen sólo se puede usar a los detectores como contadores de eventos y no es posible realizar espectrometría. Esto se debe a que la amplitud de los pulsos no está relacionada con el tipo de radiación detectada ni con la energía de la misma.

Cuando los iones de Argón llegan al cátodo del detector quedan en estado excitado y liberan su energía de excitación emitiendo fotones ultravioleta. Dichos fotones producen foto-electrones que pueden originar nuevas avalanchas. Este fenómeno origina impulsos espurios que producen un error en la medición. Es por eso que se debe llenar el recinto del detector con una mezcla de argón y otro gas, llamado extintor (o *quenching gas*), que suele ser cloro o bromo, o actualmente con preferencia un alcohol. Si se incrementa el voltaje aún más, se ingresa en la zona de Descarga Continua que no es útil para el conteo de eventos.

A continuación detallan algunas de las ventajas de los detectores gaseosos:

- Se pueden realizar mediciones en tiempo real.
- Se puede medir radiación γ , β , n, y α .
- Los contadores Geiger Müller se pueden construir de forma sencilla.

Algunas de las desventajas de los detectores gaseosos son:

- Son frágiles debido a que el filamento central suele ser muy delgado.
- Se requiere alto voltaje para su funcionamiento.

- Son sensibles a las vibraciones (efecto de microfonismo)
- Su precio es elevado, y en el caso de los detectores de ${}^3\text{He}$ son difíciles de conseguir.

2.4. Detectores Centelladores

La detección de radiaciones ionizantes por medio de materiales que generan luz es una de las técnicas más antiguas. La radiación incidente deposita su energía en un material apropiado que, como resultado de excitaciones electrónicas y su posterior decaimiento, emite fotones en el rango visible o ultravioleta (proceso de fluorescencia). El número de fotones generados es proporcional a la energía impartida al centellador. Esta conversión es lineal en un amplio rango de energías. En la Figura 2.5 se muestra el esquema de un detector por centelleo.

Los fotones producidos interactúan con un photocátodo liberando electrones que ingresan a un tubo foto-multiplicador y producen pulsos de corriente eléctrica. Luego, contando dichos pulsos se puede conocer la cantidad de eventos registrados. En el caso de los rayos gamma, este tipo de detectores permite realizar espectrometría midiendo la amplitud de los pulsos generados.

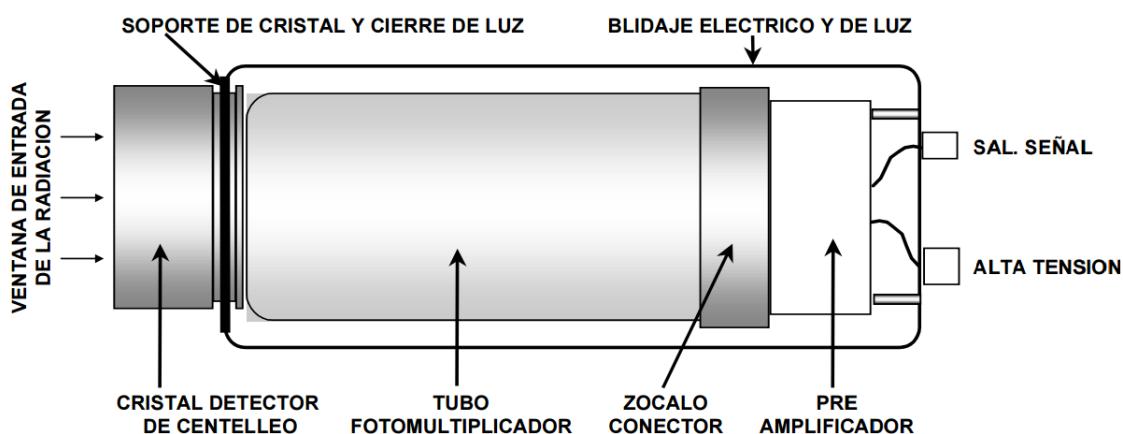


Figura 2.5: Esquema de un detector por centelleo [37].

Se puede dividir a los materiales centelladores en dos tipos: orgánicos e inorgánicos. Aunque existen centelladores de materiales orgánicos o plásticos, los inorgánicos siguen siendo los que generan más luz ante una misma excitación y son los más lineales. Extensamente usados son ciertos cristales alcalinos (inorgánicos) entre los cuales el ioduro de sodio (NaI) es el preferido por su elevado número atómico (Z) y densidad. Esto hace que, a igualdad de volumen activo, su eficiencia para la detección de gammas sea elevada en comparación con otros detectores. El NaI dopado con talio tiene un

excelente *Yield* de luminiscencia, es transparente a la luz que produce¹ y es lineal en un rango amplio de energías.

Uno de los centelladores orgánicos más utilizados es el antraceno, el fenómeno de fluorescencia puede observarse tanto en estado sólido, de vapor o como líquido en solución. Esto es una ventaja con respecto a los centelladores inorgánicos en donde el proceso de fluorescencia sólo se observa en redes cristalinas sólidas. En este tipo de centelladores sólo una fracción de la energía de la partícula incidente se convierte en luz, esto se debe a que una parte significativa de la energía empleada para excitar moléculas del centellador se transforma en calor [1][34].

Algunas de las ventajas de este tipo de detectores son:

- Los centelladores sólidos son más eficientes para detectar radiación γ que los detectores gaseosos. Esto se debe a que poseen mayor densidad atómica que un gas.
- El proceso de luminiscencia, o sea la absorción de radiación y la posterior emisión de luz, es muy rápido. Esto produce pulsos rápidos, lo cual disminuye el tiempo muerto del detector.
- Los centelladores de NaI son económicos y muy estables.

Algunas de las desventajas de este tipo de detectores son:

- La cadena de eventos que debe llevarse a cabo para convertir la radiación incidente en luz, y en la consecuente señal eléctrica incluye pasos inefficientes en la colección de portadores de información.
- En centelladores del tipo NaI se requiere del orden de 100 eV para obtener un portador de información (fotoelectrones generados en el cátodo) razón por la cual la resolución en energía es pobre.
- El NaI es un material frágil, que se daña por choques térmicos, es de respuesta lenta, y se opaca al hidratarse (hidrófilo) por lo que debe encapsularse de manera estanca.
- El hecho que sea necesario crecer un monocrystal macroscópico encarece su precio.

2.5. Detectores semiconductores

Los cristales de materiales semiconductores como el germanio y el silicio pueden utilizarse para construir detectores de radiación. En un semiconductor los átomos de

¹El NaI no es transparente a su propia luz, pero al doparlo con talio se generan estados electrónicos intermedios donde las transiciones generan fotones que no son absorbidos por el NaI.

valencia 4 forman cuatro enlaces covalentes con los átomos vecinos. Todos los electrones de valencia participan en los enlaces. Por lo tanto, si se observa la estructura de bandas de esta red cristalina se puede ver que para el caso ideal (a temperatura $T=0^{\circ}\text{K}$) la banda de valencia permanece llena y la banda de conducción se encuentra vacía. A temperatura ambiente, un pequeño número de electrones se encuentran térmicamente excitados en la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia.

En los semiconductores se realiza un proceso de dopaje, este proceso consiste en agregar átomos llamados dopantes o impurezas que poseen 3 o 5 electrones en la banda de valencia. En el caso de los átomos de valencia 5 (P, As, Sb), cuatro de los electrones forman enlaces covalentes con los átomos vecinos de Si o Ge. El quinto se puede mover libremente a través de la red cristalina y forma un conjunto de estados discretos “donores” justo bajo la banda de conducción. Debido a que existe un exceso de portadores de carga negativa, este material se llama semiconductor de tipo-n. Por otro lado, se pueden usar átomos de valencia 3 que producen un exceso de átomos con la ausencia de un electrón en la banda de valencia (llamados huecos). Estos forman estados “aceptores” justo sobre la banda de valencia, el material recibe el nombre de semiconductor tipo-p debido a que los portadores mayoritarios son huecos cargados positivamente.

2.5.1. Detectores semiconductores basados en junturas P-N

Cuando se ponen en contacto un material de tipo-p con uno de tipo-n se forma una unión p-n típica de un diodo (Figura 2.6). Los electrones del semiconductor de tipo-n pueden difundirse a través de la unión en el semiconductor de tipo-p y combinarse con los huecos. Por lo tanto, en las proximidades de la unión p-n, no hay portadores libres y se crea una región denominada zona de vaciamiento. La difusión de electrones de la región tipo-n deja atrás estados ionizados donores fijos, mientras que en la región tipo-p quedan estados aceptores fijos cargados negativamente. Se crea por tanto un campo eléctrico que finalmente impide que la difusión continúe [38].

Si alguna radiación ionizante penetra en la zona de vaciamiento se crean pares electrón-hueco, y se produce un efecto similar al que se observa de una cámara de ionización. La zona de vaciamiento tiene un comportamiento similar al de un condensador plano-paralelo. Cuando se registra un evento se mide un pulso eléctrico cuya carga integrada es proporcional a la energía depositada por la radiación ionizante en la zona de vaciamiento.

Por lo general, estos dispositivos operan con grandes voltajes inversos (1000-3000 V) que aumentan el tamaño de la zona de vaciamiento y por ende el volumen eficaz del detector². Otra de las razones por las que se necesita polarizar a los semiconductores

²Los grandes detectores gamma, como los coaxiales operan con voltajes inversos de 1000 a 3000 V. Los detectores de barrera de superficie, con junturas que van desde decenas a mil micrones, se polarizan con tensiones que varían entre decenas y centenas de volts.

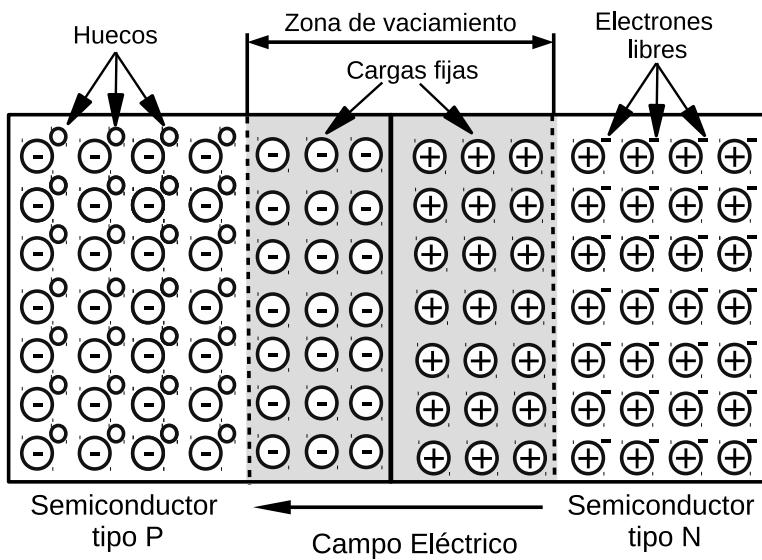


Figura 2.6: Esquema de una juntura P-N.

con alto voltaje es para que exista un campo eléctrico elevado en la juntura, de esta forma se hace más eficiente la colección de carga.

Uno de los detectores semiconductores más usados durante las décadas pasadas fue el de germanio-litio compensado o Ge(Li). Luego de un proceso de purificación, los materiales de silicio o germanio que pueden lograrse resultan de tipo p, conteniendo un exceso de impurezas aceptoras de electrones. Cuando no puede lograrse un grado superior de purificación (como en el caso del germanio hiper puro) se realiza la compensación de cargas agregando al material átomos de metales alcalinos (donores) como litio. Este proceso se conoce como *lithium ion drifting*. Puesto que la difusión del Li⁺ en una matriz de germanio es apreciable, el detector Ge(Li) debe mantenerse en ambiente criogénico en todo momento [1].

Las ventajas de este tipo de detectores semiconductores son:

- Poseen una considerable eficiencia de detección por unidad de volumen activo.
- La energía necesaria para producir un par de portadores de información en los semiconductores es aproximadamente 10 veces menor que en los gases, y 100 veces menor que en un centellador. Por lo tanto tienen muy buena resolución en energía.
- Poseen muy buena resolución temporal debido a que la movilidad de los electrones y huecos es elevada y el tiempo de recolección de cargas es muy breve (del orden del nano segundo).
- Pueden obtenerse fácilmente detectores muy delgados de manera que absorban una fracción de la energía de las partículas incidentes.

Las desventajas de este tipo de detectores semiconductores son:

- Los defectos en su estructura cristalina (es decir, las vacancias y dislocaciones) producen recombinación de los portadores y, por lo tanto, pérdida de algunos de ellos, lo que resta eficiencia de detección.
- Por lo general, es necesario refrigerarlos para poder utilizarlos. En el caso de los detectores Ge(Li) deben mantenerse en todo momento refrigerados para que no se dañen.
- No es posible disponer de grandes volúmenes activos.

2.5.2. Detectores semiconductores CCD

Los CCD son otro tipo de detectores semiconductores que, si bien fueron diseñados para detectar luz, pueden ser utilizados para la medición de radiación ionizante. Esta tecnología fue inventada en el año 1969 en los laboratorios “AT&T Bell Labs” por Willard Boyle y George E. Smith quienes recibieron el Premio Nobel por este desarrollo [39]. Las siglas CCD provienen del inglés *charge coupled device*, dispositivo de carga acoplada. Para la fabricación de los detectores CCD se utiliza una oblea de silicio recubierta con una red de electrodos microscópicos de polisilicio³ formando capacitores polisilicio-óxido de silicio sobre la superficie (Figura 2.7). En el interior del sustrato se fabrican canales delimitados por regiones fuertemente dopadas con impurezas de tipo p (p+). A su vez, los canales se encuentran separados en regiones llamadas píxeles.

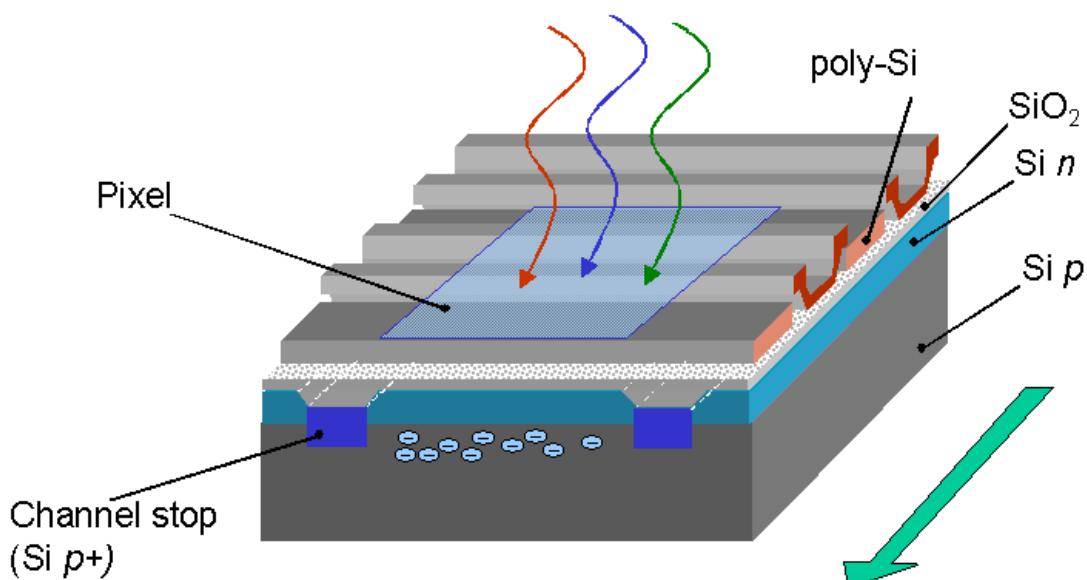


Figura 2.7: Esquema del píxel de un sensor CCD [40].

³Se llama así al silicio policristalino

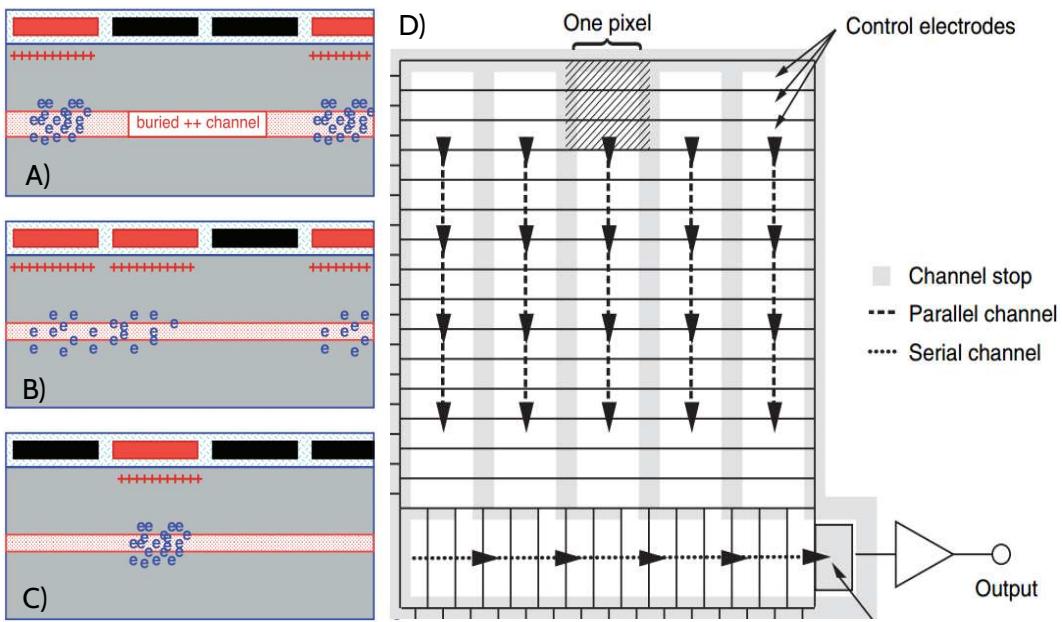


Figura 2.8: Transferencia de carga en un sensor CCD [41].

Cuando la radiación ionizante interactúa con el detector se generan electrones libres en el silicio. Las cargas generadas se retienen en cada uno de los píxeles aplicando un voltaje positivo en uno de los electrodos (Figura 2.8 A). Periódicamente se lee el contenido de cada píxel haciendo que los electrones se desplacen desde la posición donde se originaron hacia un amplificador de señal con el que se genera una corriente eléctrica que será proporcional al número de carga colectada en el píxel (Figura 2.8 D). Para desplazar la carga se aplica tensión a los electrodos como se muestra en la Figura 2.8 B y C. Las cargas se mueven por los canales en forma vertical hasta llegar a un canal horizontal con el que se las traslada hacia el amplificador de salida (Figura 2.8 D). Para coordinar los períodos de exposición y lectura de los píxeles deben existir señales de control externas para alimentar a los electrodos. La forma y amplitud de estas señales son críticas en la operación de lectura del contenido de los píxeles [41].

Algunas de las ventajas de este tipo de detectores son:

- Se pueden lograr detectores de superficies cercanas al cm².
- Debido a que el detector está dividido en píxeles se puede conocer la zona del detector en la que se recibió la radiación con alta resolución espacial.
- Se puede discriminar eventos producidos por partículas α en campos mixtos ($\alpha + \gamma$) estudiando la forma de los eventos detectados [42].

Algunas de las desventajas de este tipo de detectores son:

- Si se desean tiempos de exposición largos se debe mantener a los detectores refrigerados con nitrógeno para disminuir el ruido térmico.

- No tienen buena resolución temporal debido a que para realizar la lectura de este tipo de detectores se requiere leer todos los píxeles en forma serial.

Una característica que puede resultar una ventaja o una desventaja, (dependiendo de la aplicación) es que por su delgado espesor serán aptos para detección de partículas cargadas pero de baja eficiencia para detección de radiación γ o X.

2.6. Sumario del capítulo

En este capítulo se presentaron las técnicas de detección de radiación más utilizadas en la actualidad, y se analizaron sus principales ventajas y desventajas. Tanto en los dosímetros TLD como en los de emulsión fotográfica no se puede conocer la dosis recibida de manera inmediata. Los detectores gaseosos, los centelladores, y los detectores semiconductores estudiados requieren de altas tensiones para ser polarizados, son costosos y frágiles. En el caso de los centelladores se necesitan foto-multiplicadores para realizar las mediciones. Los detectores CCD y los detectores de Ge(Li) deben estar refrigerados con nitrógeno. Debido a todos estos inconvenientes, sería deseable disponer de una técnica que permita detectar radiación ionizante con un dispositivo sencillo y económico, que permita obtener lecturas de forma instantánea, con buena resolución espacial y temporal.

Capítulo 3

Los sensores de imagen CMOS, principio de funcionamiento y primeras pruebas con radiación

En la actualidad los sensores de imagen basados en tecnología CMOS también llamados *Active Pixel Sensors* (APSs) son la tecnología más usada para registrar imágenes y video en dispositivos de consumo masivo como cámaras de fotos, teléfonos celulares, computadoras, etc. Gracias a su desempeño también están comenzando a ser utilizados en aplicaciones científicas y espaciales. Mas del 90 % de los sensores de imagen fabricados son CMOS, y se espera que esa cifra aumente al 95 % en algunos años [43]. Si se los compara con sus predecesores, los sensores del tipo CCD, presentan numerosas ventajas: su consumo de potencia es bajo, su velocidad es elevada, poseen la capacidad de integrar muchas funciones dentro de un chip, y en general tienen menor costo. Gracias a los últimos avances tecnológicos, los sensores de imagen CMOS están logrando igualar a los CCD en términos de sensibilidad.

En este capítulo se describirán los conceptos básicos de la tecnología CMOS. Luego en la Secciones 3.2 y 3.3 se describirá el principio de funcionamiento de los sensores de imagen CMOS y los fenómenos físicos presentes durante la interacción de los APS y la radiación ionizante. Por último, se realizará un análisis de las posibilidades que posee esta tecnología para ser utilizada en la detección de este tipo de radiación.

3.1. La tecnología CMOS

La sigla CMOS proviene de *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* y es un conjunto de tecnologías utilizadas para la fabricación de circuitos integrados. La mayoría de los circuitos integrados electrónicos fabricados en la actualidad como microprocesadores, memorias, procesadores digitales de señales, etc., utilizan tecnologías CMOS.

La idea original fue patentada en Estados Unidos en 1963, y fue creada en los laboratorios de Fairchild Semiconductor, por Frank Wanlass [38]. Los chips CMOS están basados en dos tipos de transistores de efecto de campo complementarios los PMOS y los NMOS. Mediante combinaciones de estos transistores se pueden crear compuertas lógicas, que a su vez, permiten realizar diseños de circuitos digitales más complejos. Es posible además construir algunos sensores y circuitos analógicos utilizando estos procesos [44].

En la Figura 3.1 se puede observar como está construido un transistor del tipo NMOS, uno del tipo PMOS y los símbolos con los que son representados. Estos dispositivos poseen cuatro terminales: *drain* (D), *gate* (G), *source* (S) y el sustrato o *bulk* (B). Entre el terminal de *gate* y el sustrato se crece una fina capa de óxido de silicio que idealmente no permite el paso de la corriente eléctrica. Cuando se aplica una tensión positiva (V_{gs}) entre el terminal de *gate* y el sustrato de un transistor tipo NMOS, se crea un campo eléctrico bajo la capa de óxido que genera primero una zona de vaciamiento de portadores mayoritarios (en este caso huecos). A medida que se aumenta la tensión de V_{gs} hace crecer la concentración de portadores minoritarios (en este caso electrones).

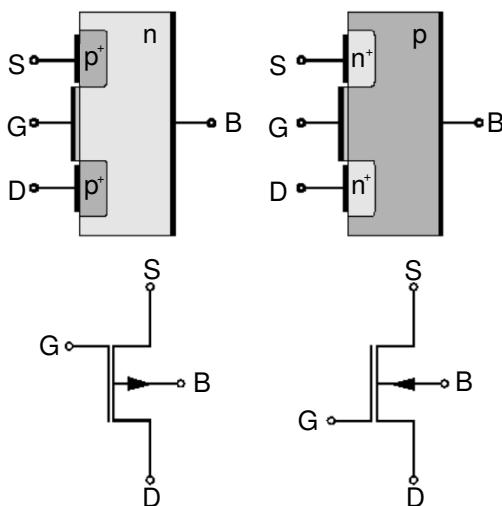


Figura 3.1: Esquema y símbolos de un transistor PMOS (izquierda) y un NMOS (derecha).

Cuando la tensión V_{gs} es mayor a un umbral llamado V_t la concentración de electrones libres debajo del óxido se hace muy elevada generando un canal N (Figura 3.2). Por lo tanto, si se aplica una tensión entre los terminales de *drain* y de *source* se produce una circulación de corriente I_{DS} entre ambos terminales. En el caso de un transistor tipo NMOS la corriente es de electrones mientras que para un transistor PMOS la corriente es de huecos. La magnitud de I_{DS} puede ser controlada variando la tensión entre el terminal de *gate* y el sustrato. En un transistor del tipo PMOS el funcionamiento es inverso, ya que los portadores son huecos. En este caso, para que exista conducción la

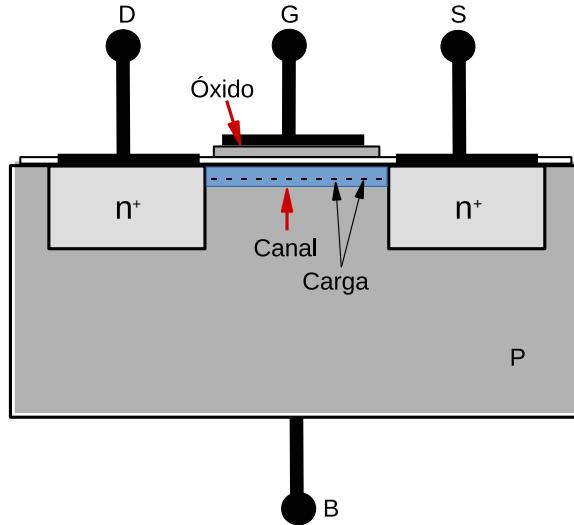


Figura 3.2: Canal N en un transistor NMOS.

tensión V_{gs} aplicada al terminal de *gate* debe ser negativa [38].

En la Figura 3.3 se muestra la curva de I_{DS} en función de la tensión V_{DS} para un transistor NMOS, en la gráfica se pueden observar las diferentes regímenes de funcionamiento. Si la tensión V_{gs} es menor al umbral V_t no circula corriente por el transistor (región de corte). Cuando la tensión V_{DS} es pequeña, la resistencia del canal permanece constante, por lo que la corriente I_{DS} varía linealmente (región lineal). Cuando la tensión de V_{DS} es elevada el transistor funciona en la región de saturación. En esta región las curvas son rectas paralelas al eje de abscisas, ya que la corriente I_{DS} sólo depende de la tensión V_{gs} .

En la Figura 3.4 se muestra el circuito y la sección transversal de un inversor CMOS, que es uno de los circuitos más básicos que se pueden realizar y está compuesto por dos transistores un NMOS y un PMOS [38]. Tanto los transistores de canal n (NMOS) como los de canal p (PMOS) son construidos en la misma oblea de silicio, para lograrlo se deben crear regiones especiales llamadas *wells* en las que el dopado del material semiconductor es opuesto al tipo de canal. Un transistor PMOS tiene que ser creado en un sustrato de tipo n o una región *N-well*, mientras que para un dispositivo NMOS se necesita un sustrato del tipo p o una región *P-well*. Los *wells* son regiones implantadas con concentraciones de dopantes más altas que las del sustrato, de forma que queden n o p.

La sección transversal mostrada en la Figura 3.4 presenta un proceso CMOS del tipo *bulk*, donde los transistores NMOS son construidos sobre el sustrato que posee dopaje del tipo p, y los dispositivos PMOS están situados sobre una región *N-well*. En la figura se pueden apreciar las secciones con diferentes tipos de dopaje y las capas de polisilicio y óxido de silicio con las que están formados los *gates* de los transistores. Para separar las regiones activas del chip (que son las secciones en donde se colocan los diversos

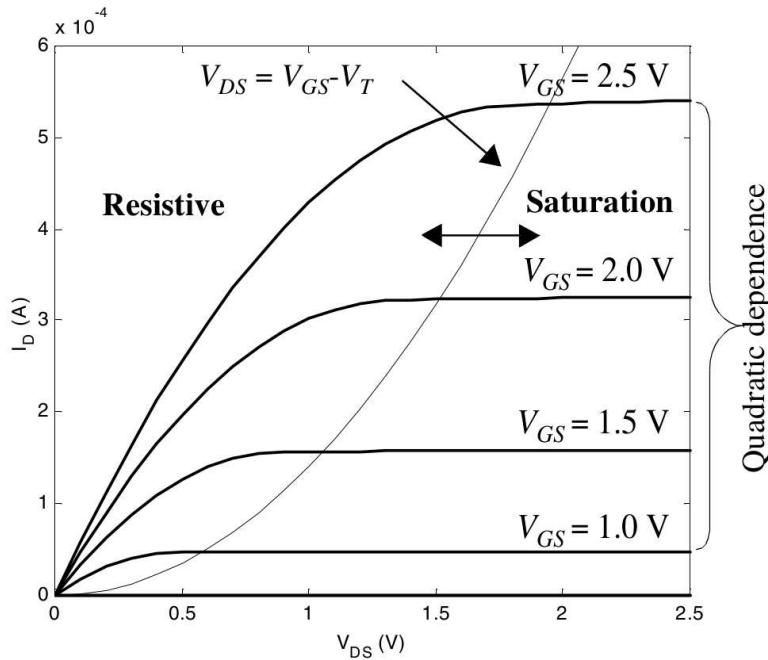


Figura 3.3: Curva de I_{DS} en función de la tensión V_{DS} [38].

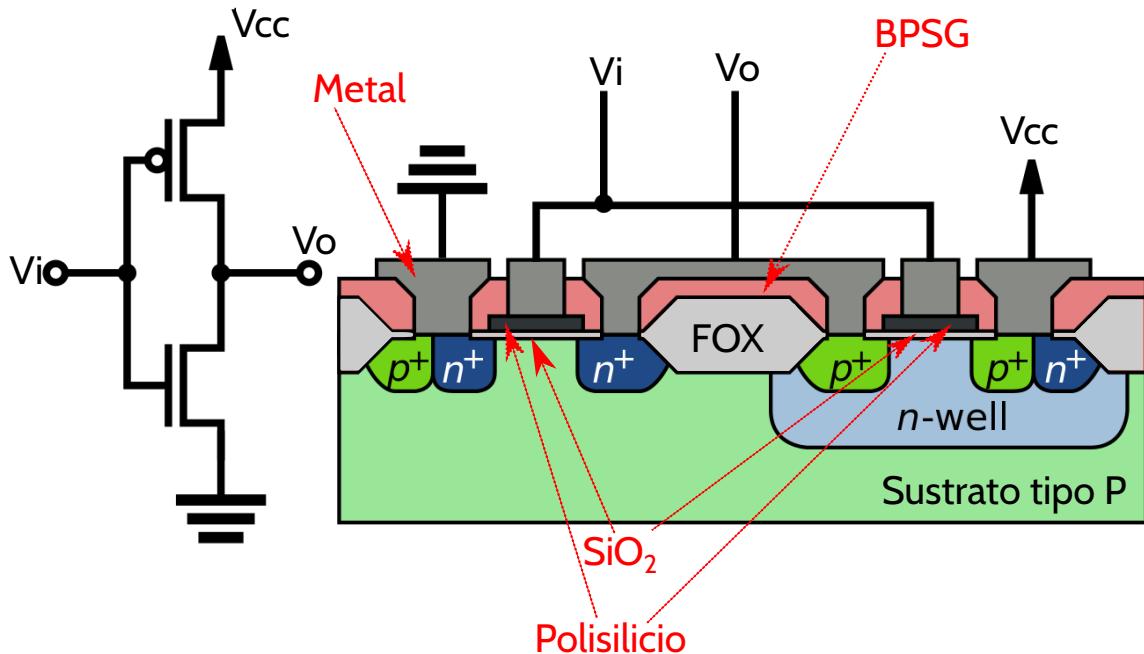


Figura 3.4: Sección transversal y circuito de un inversor CMOS [45].

componentes), se crece un óxido de silicio más grueso llamado FOX (*Field Oxide*) que es de menor calidad que el utilizado para construir los *gates* de los transistores. Para unir los diversos componentes del chip se utilizan capas de metal que están separadas entre sí por una estructura de vidrio BPSG (*borophosphosilicate*) que está dopada con boro y fósforo. Además de la estructura presentada anteriormente, existen procesos en los que los transistores se crecen en capas delgadas de Si puestas sobre aislante, llamados procesos *Silicon on Insulator* (SOI). Por lo general no se fabrican sensores

de imagen en procesos SOI, debido al menor volumen para colectar carga que poseen [38]. Los circuitos integrados basados en este tipo de transistores poseen numerosas ventajas:

- Debido a que la impedancia de entrada de los transistores es elevada el consumo de potencia estática es muy bajo.
- Los circuitos CMOS son robustos frente a ruido.
- La tecnología de fabricación está muy desarrollada, y es posible conseguir densidades de integración muy altas a un precio mucho menor que con otras tecnologías.

Algunos de los inconvenientes de los circuitos CMOS son los siguientes:

- Según se va reduciendo el tamaño de los transistores, las corrientes parásitas empiezan a ser comparables a las corrientes dinámicas (debidas a la conmutación de los dispositivos).
- El consumo de potencia aumenta con la frecuencia de operación de los circuitos.
- Los transistores MOS poseen una menor ganancia de corriente que los transistores bipolares de juntura, lo cual los hace peores para algunas aplicaciones analógicas.
- Algunas tecnologías CMOS son vulnerables a *latch-up*: Este fenómeno consiste en la existencia de un tiristor parásito en la estructura CMOS que produce un camino de baja resistencia a la corriente de alimentación que acarrea la destrucción del dispositivo. Esta estructura parásita entra en conducción cuando la tensión de salida supera la alimentación o cuando un circuito está expuesto a radiación ionizante y es impactado por una partícula que posee mucha energía.

3.2. Principio de funcionamiento de los sensores de imagen CMOS

El funcionamiento de los sensores de imagen CMOS se basa en el efecto fotoeléctrico. Un circuito integrado de este tipo se compone de una matriz de píxeles llamados APS (*Active Pixel Sensor*) como se puede observar en la Figura 3.5 A. Cada uno de los píxeles está formado por un fotodiodo y generalmente por tres transistores. Se busca que el diodo ocupe la mayor parte del área del píxel debido a que es el elemento sensible a la luz. En el caso de los sensores color la luz incidente atraviesa una microlente y un filtro de Bayer (Figura 3.5 B). La microlente es utilizada para enfocar la luz en la superficie del diodo. El filtro de Bayer es utilizado para separar la luz en los distintos

Los sensores de imagen CMOS, principio de funcionamiento y primeras pruebas con radiación

34

colores primarios. En general, los sensores blanco y negro no poseen microlentes ni filtros de Bayer, por lo que la luz incide directamente sobre la capa de BPSG y demás materiales aislantes que recubren al chip.

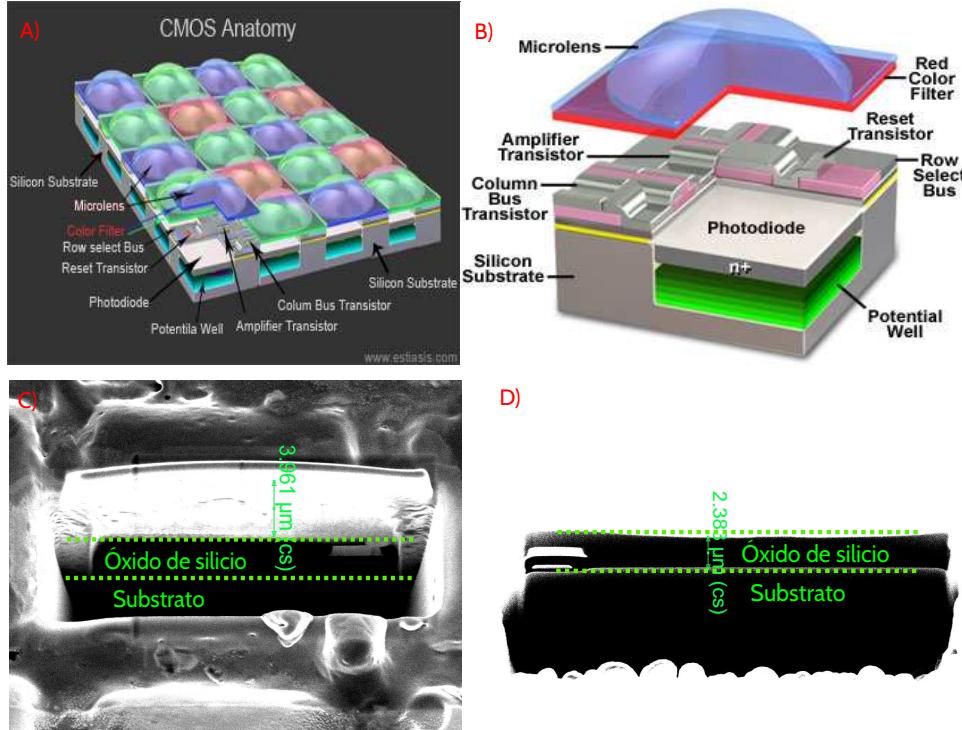


Figura 3.5: A) Matriz de píxeles APS [46]. B) Diagrama de un píxel APS [47]. C) Corte de uno de los píxeles de un sensor color tomado con un microscopio SEM. D) Corte de uno de los píxeles de un sensor blanco y negro tomada con un microscopio SEM ¹.

En las Figuras 3.5 C y D se muestran los cortes transversales de un píxel blanco y negro y uno color. Las imágenes fueron tomadas con un *Scanning Electron Microscope* y los cortes transversales fueron realizados con un *Focus Ion Beam*. Las muestras pertenecen a dos de los sensores que se utilizaron para realizar este trabajo, la Figura 3.5 C pertenece a un píxel color y la Figura 3.5 D a uno blanco y negro. En ellas se pueden ver las diferentes capas con las que están conformados los píxeles. En el caso del sensor color es posible observar la microlente (que tiene un espesor de aproximadamente $4\mu\text{m}$), la capa de óxido de silicio que recubre al chip, y el substrato en donde se encuentra el área activa del píxel. Se puede observar que el APS blanco y negro no posee microlente y que el espesor de la capa de óxido de silicio es de aproximadamente $2.38\mu\text{m}$.

Además del fotodiodo cada APS posee tres transistores conectados como se muestra en el circuito de la Figura 3.6 A. Los transistores T1 y T3 pueden ser modelados como llaves debido a que se utilizan en los regímenes de corte y saturación. El transistor T2 se

¹ Imagenes tomadas por el autor de este trabajo con un microscopio del tipo *Scanning Electron Microscope* (FIB/SEM) perteneciente al Centro de Investigación y Desarrollo en Micro y Nano Electrónica del Bicentenario (CMNB) del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

utiliza en la zona de saturación y es equivalente a un amplificador de ganancia unitaria e impedancia de entrada muy elevada. El fotodiodo se polariza en inversa, por lo tanto, puede modelárselo como un capacitor equivalente a la capacitancia de la región de deserción [38]. Cuando se tienen en cuenta todas las consideraciones anteriores se llega a un circuito equivalente como el que se muestra en la Figura 3.6 B.

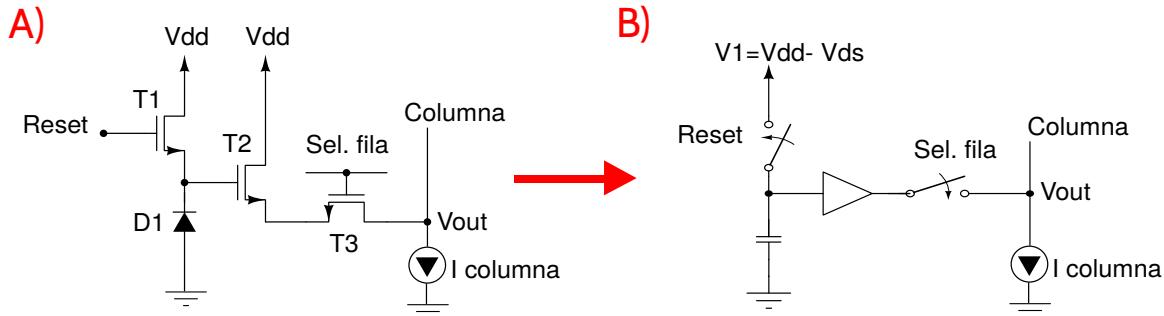


Figura 3.6: A) Circuito de un APS. B) Circuito simplificado.

El ciclo de lectura del píxel consta de tres partes: *reset*, integración y lectura. Durante la primer parte del ciclo (*reset*) se coloca al transistor T1 en el régimen de saturación. Esto equivale a cerrar la llave de *reset* del circuito de la Figura 3.7 B, por lo que el diodo D1 se polariza en inversa con una tensión V1. En la Figura 3.7 A se muestra el diagrama de la juntura del diodo en donde se puede observar el sustrato, que es un semiconductor del tipo P y la zona con dopaje del tipo N. Cuando la juntura se polariza en inversa se produce una zona de vaciamiento cuyos límites se representan con líneas punteadas. Dentro de esta zona, en una primer aproximación, no hay cargas libres y existe un campo eléctrico entre la región P y la N dado por la carga fija de la zona de vaciamiento.

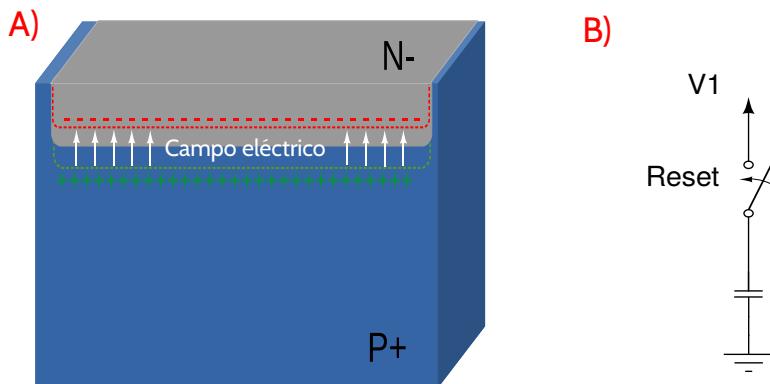


Figura 3.7: A) Juntura del diodo con polarización en inversa. B) Circuito equivalente utilizado para el *reset*.

En la segunda parte del ciclo de lectura (integración) se corta la circulación de corriente por el transistor T1 por lo que el diodo queda desconectado de la tensión de alimentación. Debido a la capacidad parásita de la juntura en inversa la tensión

en D1 se mantiene en el valor de *reset*. Cuando un fotón incide sobre la juntura, se genera un par electrón-hueco. Ambos portadores son arrastrados por el campo eléctrico (Figura 3.8 A) descargando la capacidad de la juntura en inversa, es decir, reduciendo su tensión. El APS es mantenido en esta condición por un lapso de tiempo llamado “tiempo de integración”. En la Figura 3.8 B se muestra como varía el valor del voltaje del diodo D1 durante un ciclo de lectura. Se puede notar que durante la integración la tensión disminuye a medida que va aumentando el tiempo de exposición a la luz y se colecta carga generada por los fotones. La velocidad de descarga es una función de la cantidad de fotones recibidos, cuanto mayor luz recibe el APS mas rápido disminuye la tensión.

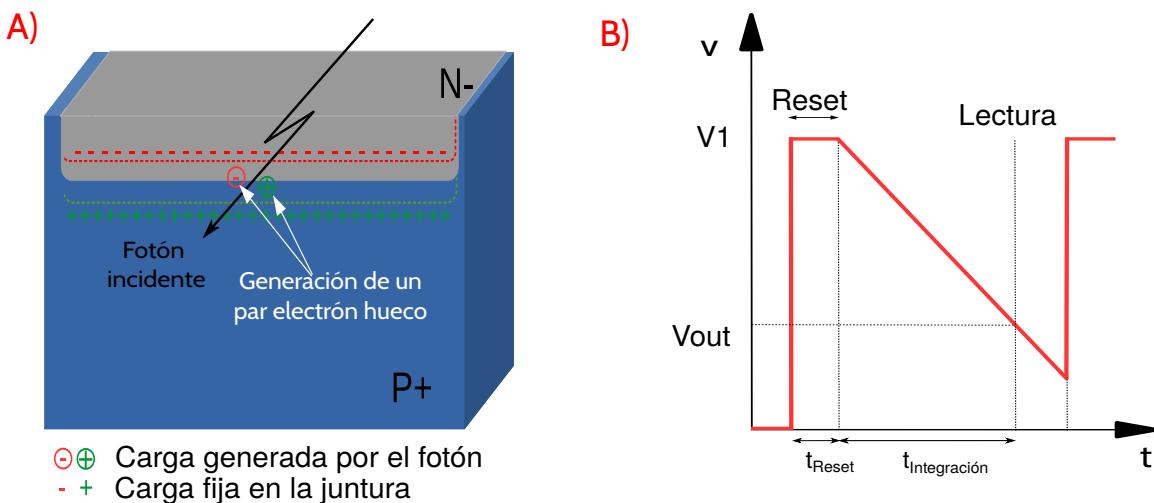


Figura 3.8: A) Recombinación de cargas en la zona de vaciamiento durante la integración. B) Tensión en el diodo en función del tiempo durante el ciclo de lectura del APS.

Finalizado el tiempo de integración, es necesario medir el valor de tensión presente en el diodo (V_{D1}) para conocer cuánta luz recibió el píxel. Se debe tomar una muestra de V_{D1} sin modificarla, para esto se utiliza al transistor T2 que actúa como un seguidor de tensión. Cuando los transistores T2 y T3 entran en conducción por ambos circula la corriente $I_{Columna}$. El valor de tensión en la salida del APS será:

$$V_{out} = V_{D1} - V_{gs}(I_{Columna}) \quad (3.1)$$

El valor de V_{gs} de un transistor CMOS es función de la corriente que circula entre los terminales de *Drain* y *source* y en este caso $V_{gs}(I_{Columna})$ representa el valor de tensión entre los terminales de *gate* y *source* para que el transistor T2 pueda mantener la corriente $I_{Columna}$. Debido a que la impedancia de entrada de un transistor CMOS es muy elevada el valor de V_{D1} no se modifica durante la lectura.

En la Figura 3.9 se muestra un esquema de la interconexión de píxeles dentro de la matriz que conforma un sensor. Las salidas de los APS de una misma columna se encuentran interconectadas entre sí. La matriz es leída de a una fila a la vez, mediante

los transistores T3 se transfiere el valor de las salidas de la fila seleccionada a las líneas de columna. Luego, cada valor de tensión presente en las columnas es muestreado, amplificado y digitalizado. Frecuentemente, los conversores analógicos a digitales (ADC) están integrados en el mismo chip que el arreglo de píxeles, por lo que directamente se accede a los valores digitalizados. Como resultado se obtiene generalmente una matriz de números² con la que se puede construir la imagen detectada por el sensor. Los valores numéricos obtenidos luego de la digitalización son proporcionales a la cantidad de luz recibida por cada uno de los píxeles. Frecuentemente este tipo de circuitos integrados incluso convierten la imagen obtenida a un formato como PAL-N o NTSC, dando como salida una señal de video [48].

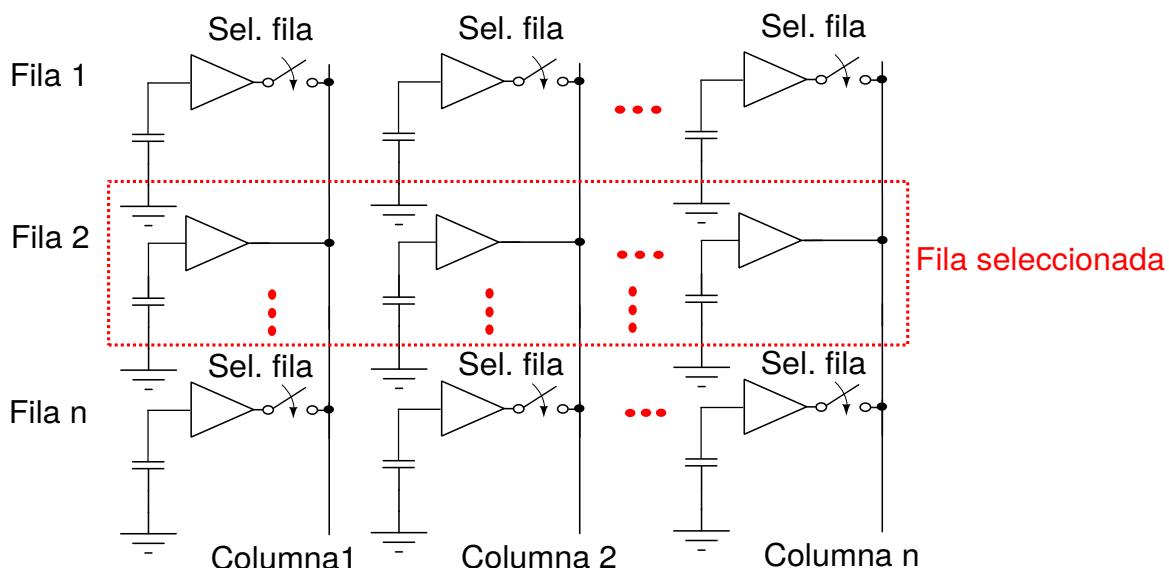


Figura 3.9: Lectura de la matriz de píxeles de un sensor.

3.3. Interacción de los *Active Pixel Sensor* y la radiación ionizante

En esta sección se estudiará la interacción entre la radiación ionizante y los píxeles del tipo APS. Los efectos físicos producidos por partículas cargadas en este tipo de circuitos integrados han sido extensamente estudiados en la bibliografía, ya que son los mismos efectos que causan errores (*single event effects*) en circuitos integrados sometidos a la radiación, por ejemplo en satélites. Como fue explicado en la sección anterior, el funcionamiento de un *Active Pixel Sensor* se basa en una juntura del tipo P-N. Por lo que es de esperar que la interacción entre un APS y la radiación ionizante sea similar a la que se produce en los detectores semiconductores (Sección 2.5.1) [49] [50][51][52].

²En el caso de los sensores color se obtienen tres matrices una por cada uno de los colores primarios

Para simplificar la explicación de los fenómenos físicos presentes durante la interacción de la radiación con los píxeles se supondrá que los APS no están recibiendo luz visible. La interacción entre un APS y la radiación comienza cuando una partícula ionizante (por ejemplo una partícula cargada) con mucha energía penetra en la superficie del semiconductor. A lo largo de la trayectoria de la partícula se produce una distribución radial de pares electrón-hueco como se muestra en la Figura 3.10 A. Si la trayectoria de la partícula atraviesa la zona de vaciamiento del fotodiodo, los portadores son rápidamente colectados (alrededor de unos picosegundos) por el campo eléctrico presente en la juntura compensando a la carga almacenada en la misma. Como resultado, se produce una disminución en la tensión V_{D1} , que es permanente si el diodo se encuentra desconectado de la alimentación y es temporaria cuando está siendo alimentado.

Fuera de la zona de vaciamiento, el desequilibrio de carga induce una distorsión temporal del potencial en forma cónica a lo largo de la trayectoria de la partícula (Figura 3.10 B). Esto se traduce en una corriente de arrastre que lleva los portadores libres dentro de la zona de vaciamiento, y produce aun mas colección de carga en la juntura. El efecto ocurre en un periodo muy corto de tiempo (decenas de picosegundos), y se completa cuando la distorsión en el potencial se suaviza [49][50][51][52].

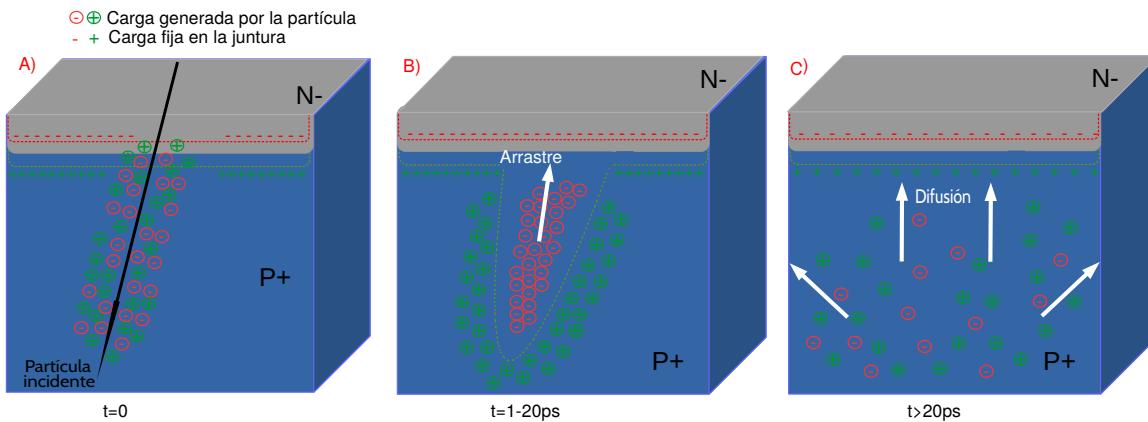


Figura 3.10: A) Carga generada por la partícula incidente en la juntura. B) Colección de carga por arrastre. C) Colección de carga por difusión.

Por último, las cargas que se generan en el interior del substrato se difunden y se produce más colección de carga en el píxel en donde se originó el evento y también en los píxeles aledaños (Figura 3.10 C). En este caso el fenómeno ocurre en un período de tiempo de cientos de picosegundos. El transitorio de colección de carga generado por el evento origina un pico de corriente en la juntura como se muestra en la Figura 3.11 A. La forma de la curva está definida por los tres mecanismos de colección de carga explicados anteriormente. En general, cuanto más lejos de la juntura se produce el evento menor es la cantidad de carga colectada [49]. Como ejemplo de de valores característicos, para procesos de fabricación con tecnologías menores a la del micrómetro el transitorio de

colección de carga ocurre en un período de tiempo de aproximadamente 200 ps, y la máxima colección de carga se produce a una distancia de entre 2 y 3 μm de la región de la juntura [49]. Cabe destacar que estas constantes de tiempo dependen ampliamente del tipo de ion, su energía inicial, y las especificaciones del proceso de fabricación del chip.

Si la partícula incide sobre el APS durante el intervalo de integración producirá una caída de tensión en los píxeles cercanos a su trayectoria que podrá ser leída. En la Figura 3.11 B se puede ver la variación de tensión en el diodo durante todo un ciclo de lectura. En este caso, la partícula incidente ocasiona una caída abrupta de tensión en el diodo. La amplitud de la descarga es directamente proporcional al *stopping power* de la partícula, debido a que es función de la carga generada en el semiconductor.

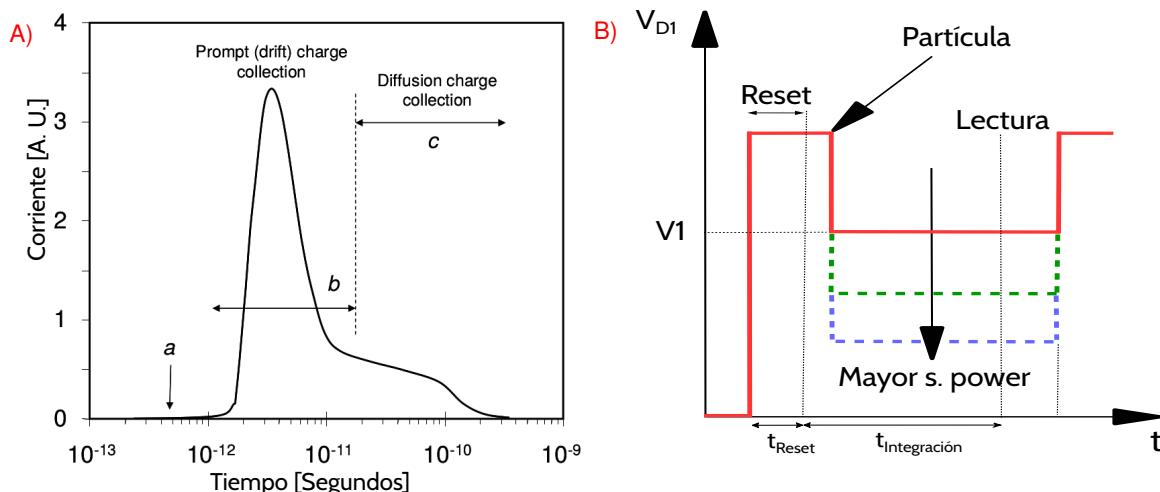


Figura 3.11: A) Gráfico de corriente en la juntura en función del tiempo [49]. B) Variación de tensión en el diodo producida por una partícula incidente durante un ciclo de lectura.

3.4. Primeras pruebas con radiación

En esta sección se mostrarán los resultados de la primeras mediciones realizadas para evaluar la factibilidad de la utilización de sensores de imagen CMOS para la detección de radiación ionizante. Por lo descripto en la sección anterior, se conocen los fenómenos físicos que ocurren durante la interacción entre los píxeles del tipo APS y la radiación ionizante. Para evaluar el comportamiento real de los sensores se realizaron irradiaciones con fuentes radioactivas.

En la Figura 3.12 se puede ver el esquema experimental utilizado para realizar las mediciones. Se utilizaron cámaras de video comerciales construidas con sensores CMOS, a las cuales se les retiró el sistema óptico y una capa de vidrio que cubre el sensor de manera de dejar el chip expuesto completamente. Esta capa de vidrio normalmente es utilizada para filtrar la radiación infrarroja y proteger al sensor del polvo. Con el objetivo de que las partículas α no incidieran sobre una parte del sensor, se cubrió una

mitad del mismo con una hoja de papel. Por último, se colocó la placa que contiene el sensor en una caja plástica oscurecida para que no ingresara luz durante las mediciones.

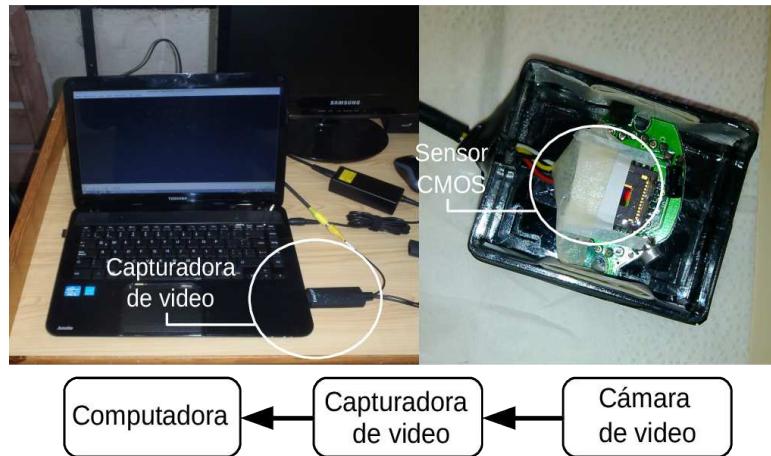


Figura 3.12: Esquema experimental utilizado para realizar las primeras mediciones.

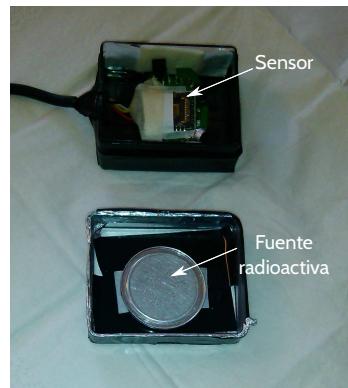


Figura 3.13: Fuente radioactiva dentro de la caja de acrílico.

La señal proveniente del sensor fue digitalizada y enviada a una PC por medio de una capturadora de video. Los datos que ingresaban a la PC por el puerto USB fueron almacenados en forma de video. Se realizaron mediciones con fuentes de ^{241}Am , que emite partículas α y fotones γ , y de ^{137}Cs que emite partículas β y fotones γ con el objetivo de observar la respuesta de los sensores a distintos tipos de radiación. Se colocaron las fuentes calibradas sobre el sensor, luego la caja fue cerrada para que no ingresara luz (Figura 3.13). En primer lugar se irradió al sensor con la fuente de ^{137}Cs y se registró un video en el que se puede ver una considerable cantidad de eventos de diversas formas. En la Figura 3.14 se muestra un cuadro de dicho video. En segundo lugar, se irradió el sensor con la fuente de ^{241}Am (que fue colocada dentro de la caja) y se pudieron ver eventos de mayor intensidad y forma circular sólo en la parte del sensor que no estaba cubierta con papel (Figura 3.15). Con esta segunda fuente se observaron

eventos de menor intensidad en la región no cubierta por el papel, que como se discutirá posteriormente están asociadas a fotones γ .

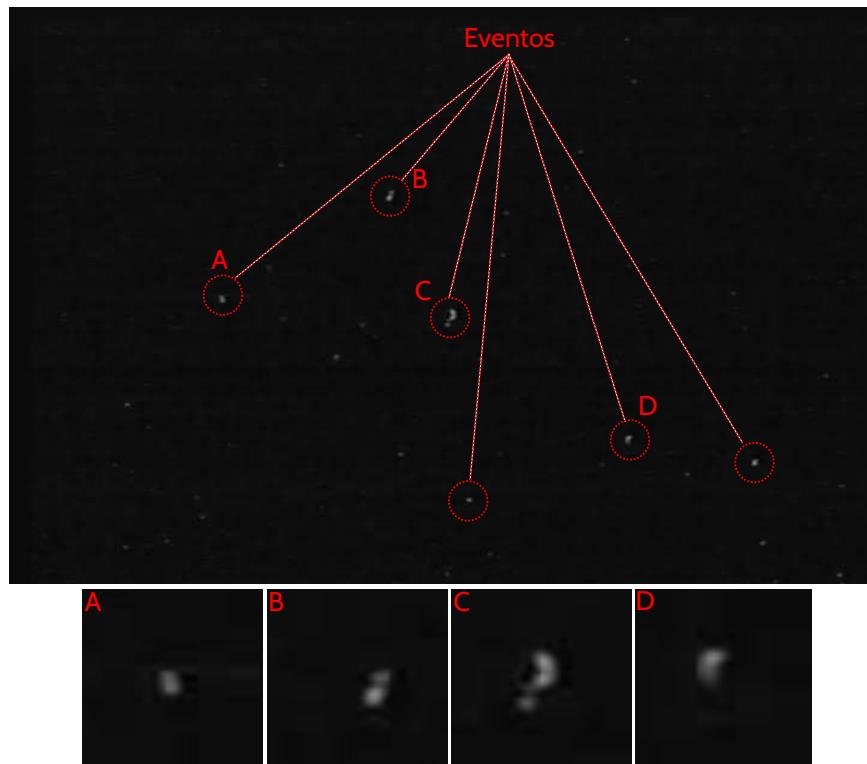


Figura 3.14: Cuadro del video registrado en la irradiación con la fuente de ^{137}Cs . En la parte inferior de la figura se muestran ampliaciones de las imágenes de los eventos registrados.

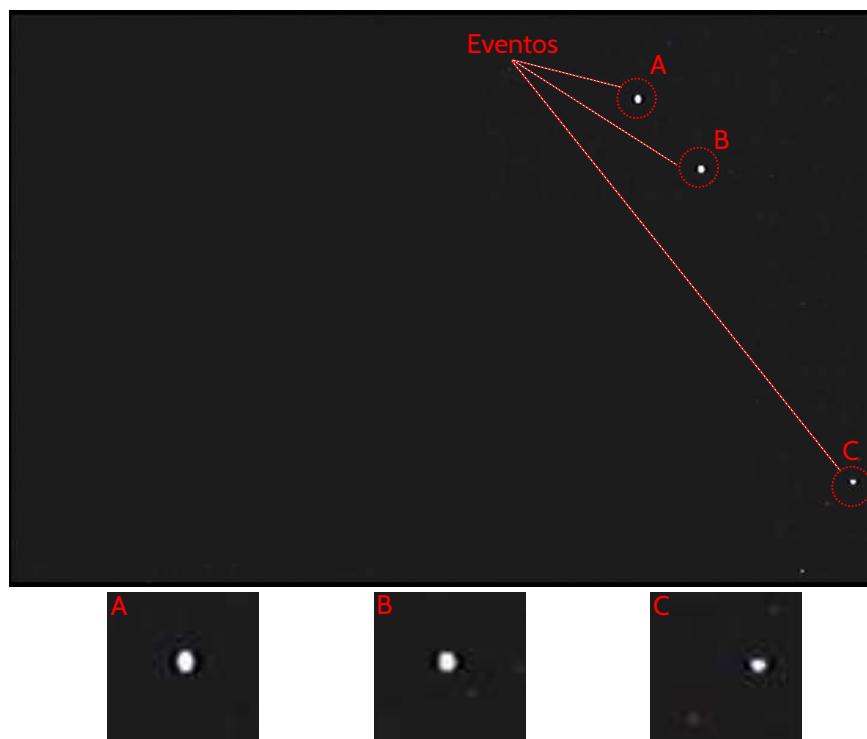


Figura 3.15: Cuadro del video registrado en la irradiación con la fuente de ^{241}Am . En la parte inferior de la figura se muestran ampliaciones de las imágenes de los eventos registrados.

3.5. Sumario del capítulo

En este capítulo se realizó una breve introducción en la que se mostraron las características principales de la tecnología CMOS y el funcionamiento de los sensores de imagen del tipo *Active Pixel Sensor*. Luego, se explicaron los efectos presentes durante la interacción entre la radiación ionizante y los píxeles APS. Por último, se demostró experimentalmente que los sensores de imagen CMOS son sensibles a diversos tipos de radiación como partículas alfa y rayos gamma. Teniendo en cuenta los resultados preliminares de las primeras mediciones realizadas en el marco de este trabajo, se puede concluir que este tipo de dispositivos podrían ser utilizados para el desarrollo de una técnica para la detección de radiación ionizante.

Capítulo 4

Implementación y desarrollo de la técnica de detección de radiación ionizante propuesta

En este capítulo se describirá la técnica de detección propuesta. Se comenzará con una descripción de las cámaras empleadas para el desarrollo del proyecto y el esquema experimental utilizado para realizar las mediciones. Luego, se explicará el funcionamiento del *software* desarrollado para el análisis de los videos capturados con las cámaras. Este *software* se utiliza para contar, clasificar, y calcular diversos parámetros de los eventos registrados por el sensor. En la Sección 4.4, se describirán las fuentes de ruido presentes en los sensores y el filtro autorregresivo utilizado para eliminarlas. Por último se realizará un análisis estadístico de los valores de los píxeles del sensor para comprobar el funcionamiento del filtro propuesto.

4.1. Cámaras utilizadas

Con el fin de adquirir experiencia en la interacción de los sensores de imagen con la radiación y poder caracterizar su comportamiento se decidió utilizar cámaras de video comerciales basadas en sensores APS CMOS para realizar las pruebas con radiación. Se eligieron dos modelos de cámaras: CGH 309D y JMK JK-801, en la Figura 4.1 se muestra una imagen de las mismas. El primer modelo cuenta con un sensor color modelo MT9V011 de la marca APTINA de 0,25 pulgadas, que posee una matriz de 640 x 480 píxeles, de $5.6 \times 5.6 \mu\text{m}$ [53]. El segundo modelo está basado en un sensor blanco y negro modelo OV5116N de la marca OmniVision que posee una matriz de 320 x 240 píxeles de $11 \times 11 \mu\text{m}$ [48].

Las cámaras color poseen un circuito de procesamiento de imágenes VIMICRO VC0702 con el que se convierten los datos provenientes del sensor a una señal de vídeo

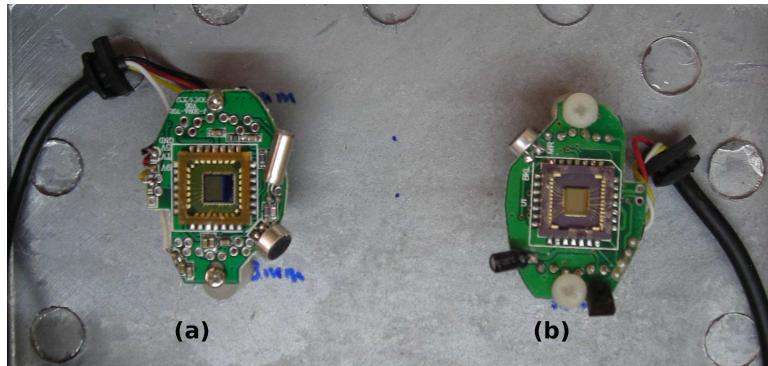


Figura 4.1: A) Cámara color modelo CGH 309D [53]. B) Cámara blanco y negro modelo JMK JK-801 [48].

PAL-N. Por otra parte, los sensores blanco y negro poseen un modulo interno con el que se realiza la conversión por lo que no se necesita ningún circuito integrado externo para tal fin.

La estructura de los sensores se analizó utilizando un *Focus Ion Beam* (FIB) y un microscopio electrónico de barrido (SEM) para estudiar el espesor de las capas presentes sobre el área activa de silicio. En las Figuras 4.2 A y B se muestran las imágenes de las matrices de píxeles de ambos sensores. En la imagen del sensor color se pueden identificar claramente las microlentes, y por ende la posición de cada uno de los píxeles. Por otra parte, en la imagen del sensor blanco y negro se puede apreciar la ausencia de las microlentes, así como también las líneas de metal que interconectan a los píxeles.

Los sensores blanco y negro poseen una capa de aislante¹ con un grosor de aproximadamente $2,2\mu\text{m}$ en la parte superior de la capa epitaxial de silicio (Figura 4.2 C), que es el área activa del sensor. La mayor parte de la superficie de cada píxel está cubierta con esta capa de aislante, y una fracción de su área con las pistas de metal con el que se realizan las conexiones dentro del chip. El sensor color posee un filtro de Bayer con un espesor de entre 4 y $5\mu\text{m}$, y una capa de óxido de aproximadamente $4\mu\text{m}$ en la parte superior del área activa de silicio (Figura 4.2 D). Las partículas que incidan sobre el sensor, y las que se produzcan luego de una interacción deberán pasar por estas capas antes de ingresar al área activa del sensor.

4.2. Esquema experimental

El esquema experimental utilizado para realizar las mediciones es similar al descripto en la Sección 3.4 y se muestra en la Figura 4.3. Las cámaras se colocaron dentro de una caja estanca a la luz. Dentro de la caja también se ubicaron las fuentes radio-

¹Estas capas de aislante generalmente son de un material llamado BPSG (*Borophosphosilicate*) que es un vidrio de silicato con aditivos como boro y fósforo.

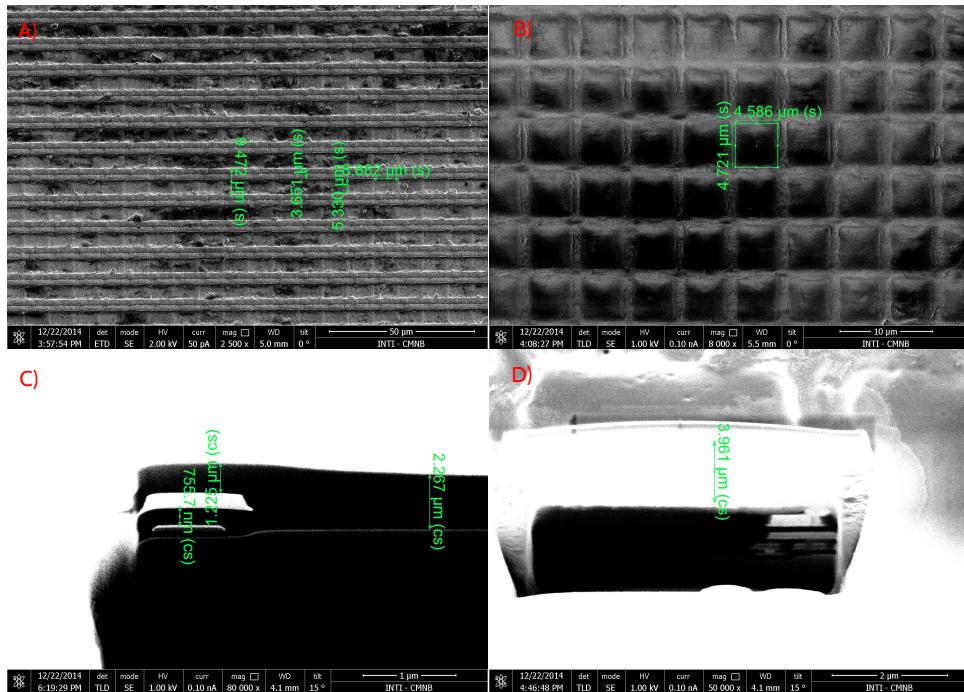


Figura 4.2: **A)** Matriz de píxeles del sensor blanco y negro OmniVision OV5116N. **B)** Matriz de píxeles del sensor color APTINA MT9V011. **C)** Corte transversal del sensor blanco y negro OmniVision OV5116N. **D)** Corte transversal del sensor color APTINA MT9V011. ²

activas lo mas cerca posible de la superficie de los sensores. Se utilizó una capturadora de video para digitalizar y enviar a una PC las señales de video producidas por las cámaras. Las señales digitalizadas fueron adquiridas en la PC con un puerto USB, y mediante el *software* “*VLC media player*” se visualizaron las imágenes en la pantalla de la computadora y se almacenaron los archivos de video en el disco rígido [54]. El formato elegido para almacenar los videos fue MPEG a una tasa de 25 cuadros por segundo, a su vez, los valores de los píxeles fueron digitalizados con una resolución de 8 bits.

Uno de los inconvenientes detectados durante el transcurso de las primeras mediciones fue la dificultad para oscurecer el interior de las cajas plásticas en donde se colocaron las cámaras. Por lo tanto, se decidió fabricar una caja especialmente diseñada para realizar las mediciones (Figura 4.4). Se eligió una caja de aluminio lo suficientemente grande como para colocar dos cámaras en su interior, cuya tapa posee una junta de goma para lograr mayor estanqueidad. Los cables de alimentación y video de las cámaras ingresan a la caja pasando por prensaestopas, de esta forma se evita que la luz ingrese por los orificios. Las cámaras se fijan a la tapa de la caja mediante niples y tornillos plásticos.

Durante las primeras mediciones realizadas, se detectó que la temperatura en el

²Imagenes tomadas por el autor de este trabajo con un microscopio del tipo *Scanning Electron Microscope* (FIB/SEM) perteneciente al Centro de Investigación y Desarrollo en Micro y Nano Electrónica del Bicentenario (CMNB) del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

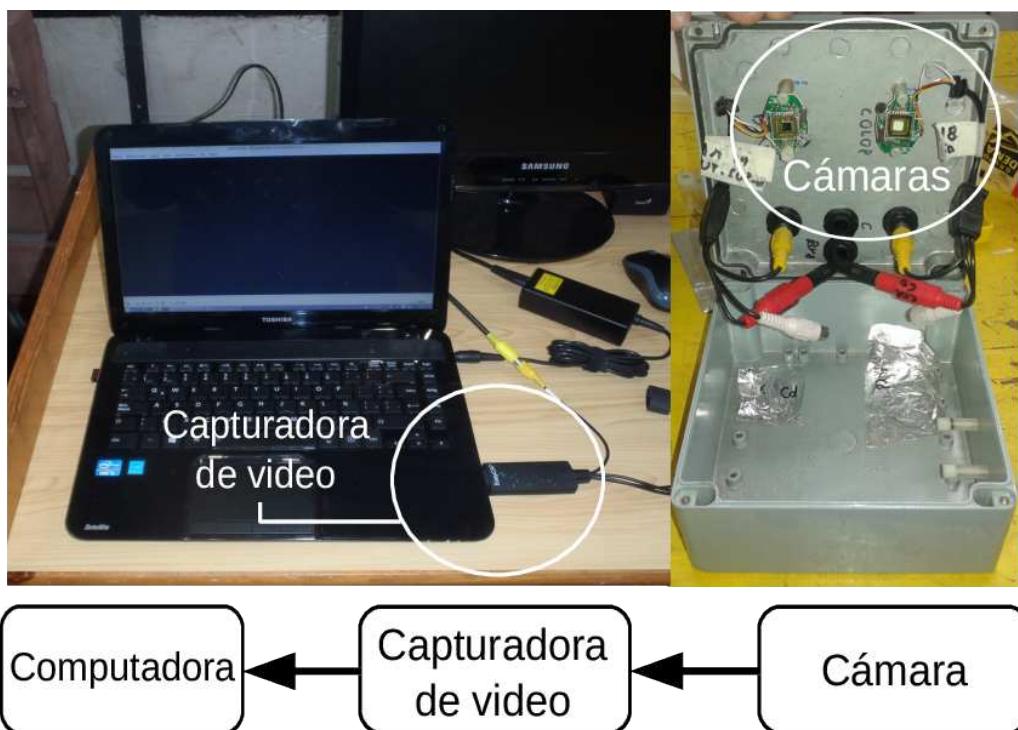


Figura 4.3: Esquema experimental.



Figura 4.4: Caja estanca a la luz diseñada para realizar las mediciones.



Figura 4.5: Accesorio para retirar el vidrio que recubre los sensores.

circuito integrado VIMICRO VC0702 (que se encarga del procesamiento de imágenes) de las cámaras color aumentaba de manera considerable, debido a que en este experimento no se utilizó un disipador. Como se mostrará en la Sección 4.4 esto origina un aumento del ruido de oscuridad y del *Fixed Pattern Noise* (FPN) de los sensores. Para solucionar este problema se colocaron dos piezas de aluminio fijadas a las cajas que hacen contacto con las cámaras actuando como disipadores.

Otro de los inconvenientes que se presentaron durante las primeras mediciones fue la extracción de los vidrios que recubrían la superficie de los sensores. Cuando se intentaba retirarlos los mismos se dañaban causando que pequeños fragmentos de cristal cayeran sobre la superficie del sensor. Para solucionar este inconveniente se diseñó el accesorio metálico que se muestra en la Figura 4.5. Este accesorio se acopla al cuerpo de un soldador de estaño y permite calentar uniformemente el bastidor en el que está adherido el vidrio y retirarlo sin daños.

4.3. Descripción del software desarrollado para el análisis de eventos

Luego de realizar la captura de los videos, se los procesa con un *software* que fue programado para tal fin en el marco de este trabajo. El mismo fue realizado con herramientas de *software* libre, y desarrollado íntegramente en lenguaje *Python* [55]. En la Figura 4.6 se muestra un diagrama de flujo del programa.

En primer lugar, el video es abierto haciendo uso de las funciones de la librería *Open CV* de *Python* con las que se lee cada cuadro y se lo convierte en tres matrices de números enteros [56]. Cada una de estas matrices contiene los valores de intensidad de los píxeles de uno de los tres colores primarios, en el caso de los videos capturados con sensores blanco y negro las tres matrices son iguales. A su vez, cada valor dentro de las matrices es proporcional a la cantidad de electrones colectados por ese píxel. Debido a que la resolución del conversor de la capturadora de video que se utilizó en este trabajo es de 8 bits, los valores de los píxeles pueden variar entre 0 y 255. Cuando el sensor es utilizado para la detección de radiación ionizante, los valores bajos significan que no hubo ningún tipo de interacción en ese píxel. Por otra parte, cuando una partícula interactúa con uno de los píxeles, se registran valores altos que incluso pueden llegar al valor máximo (saturación).

Una vez que se obtuvieron las matrices correspondientes a un cuadro del video, se comienza con el análisis de las mismas. En primer lugar, se realiza el promedio entre las tres matrices y se guarda el resultado en otro arreglo de las mismas dimensiones al que se llamará M_{cuadro} . De esta forma, se puede seguir analizando el cuadro del video operando con una sola matriz y (en el caso de los sensores color) se puede tener en

cuenta la información de los píxeles de los tres colores primarios. Luego, se realiza un filtrado (del que se hablará en la Sección 4.4) con el que se elimina el ruido de oscuridad y el FPN.

El paso siguiente en el procesamiento es verificar si existe algún evento producido por radiación en el cuadro. Como se pudo observar en la Sección 3.4, cuando una partícula incide sobre el sensor un conjunto de píxeles se descarga, y se observa un punto o una línea de color gris claro. Si se analiza la matriz M_{cuadro} correspondiente a un cuadro del video, se puede observar que en la zona en la que se produce un evento los valores de los píxeles se elevan por encima de la media de la matriz. Por lo tanto, para saber si existió un evento se busca el máximo valor de M_{cuadro} utilizando funciones de la librería *Numpy* de *Python* y se lo compara con un umbral (U_{ev}) [57].

El valor de U_{ev} debe ser elegido cuidadosamente, debido a que si es demasiado bajo, los valores aleatorios de ruido oscuro conducirían a cuentas falsas. Por otro lado, si U_{ev} es demasiado alto, muchos eventos serán ignorados, lo que lleva a que el sistema tenga menor sensibilidad. En la práctica se utiliza un $U_{ev}=20$ a.u. para los sensores color y un $U_{ev}=60$ a.u. para los sensores blanco y negro. En la Sección 4.4.2 se explicará el criterio para la selección del valor de dichos umbrales.

Cuando el valor máximo de la matriz M_{cuadro} supera el valor de U_{ev} , se copian los valores de los píxeles afectados por el evento en otra matriz de 20×20 a la que se llamará M_{ev} . Los valores de M_{ev} se utilizan para calcular diferentes parámetros del evento detectado. En primer lugar, se obtiene el momento de inercia de primer orden, con el que se puede conocer cual es la posición del centro de masa del evento. Luego se realiza la suma de todos los píxeles en la matriz M_{ev} , el resultado de esta suma (V_{suma}) es proporcional a la carga depositada por el evento registrado. Por último, se calculan los momentos de inercia de segundo orden (I_x , I_y , I_{xy}) para conocer el radio del evento e inferir si la forma del mismo se asemeja a la de un círculo. Todos estos datos se guardan en un archivo para el posterior procesamiento. El programa también realiza una cuenta de la cantidad de eventos registrados en el video y posee la opción de realizar un gráfico de malla de los mismos. Además, se genera una imagen en formato *jpeg* en la que se guardan todos los eventos registrados durante un video (Figura 4.7). Si se observa la imagen luego de procesar la totalidad de un archivo, se puede conocer en que zona del sensor se produjeron los eventos y cual es su forma.

Uno de los objetivos de este trabajo, es evaluar la capacidad de los sensores de imagen CMOS empleados para realizar una clasificación de la radiación incidente. En trabajos realizados con sensores CCD, fue demostrado que se puede realizar una clasificación de los eventos registrados utilizando sus características geométricas, y parámetros como la carga colectada en el sensor [42][58]. Para comprobar si es posible aplicar una técnica similar con los sensores utilizados en este trabajo, se desarrolló un algoritmo para la identificación de partículas alfa. Como se observó en las primeras pruebas

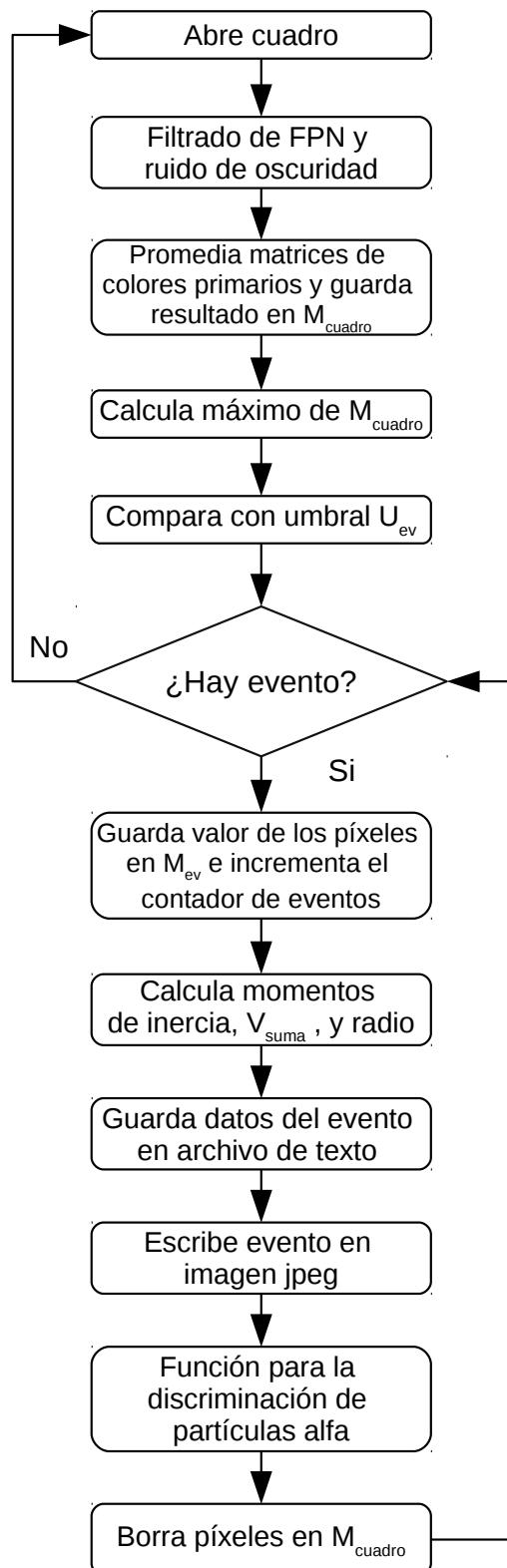


Figura 4.6: Diagrama de flujo del programa realizado para el procesamiento de videos.



Figura 4.7: Imagen de todos los eventos registrados luego de una irradiación con una fuente de ^{137}Cs generada por el *software* desarrollado.

con radiación (Sección 3.4) los eventos originados por partículas alfa presentaban una forma circular y poseían mayor intensidad. El algoritmo desarrollado utiliza la forma de los eventos, su radio, su valor máximo, y la carga colectada por los mismos para realizar la discriminación. Luego de que se detecta un evento y se calculan sus parámetros, se ingresa a una función en la que se evalúa si el evento fue originado por una partícula alfa. Este algoritmo será explicado con mayor detalle en la Sección 5.3.

El programa también registra la cantidad de eventos originados por partículas alfa que se producen en cada cuadro y graba el resultado en un archivo para el posterior procesamiento. Además, se genera una imagen *jpeg* con todos los eventos originados por partículas alfa que se producen a lo largo del video. Una vez que se finaliza con el análisis de un evento, los píxeles que se almacenaron en la matriz M_{ev} son borrados de la matriz M_{cuadro} . De esta forma no se vuelve a analizar el mismo evento. Luego, se comprueba si existe algún otro evento en el cuadro, si no es así se pasa al siguiente cuadro. Además de las dos imágenes *jpeg*³, como resultado del procesamiento se obtienen dos archivos de texto: El primero contiene los datos de cada uno de los eventos registrados, el segundo contiene la cantidad de eventos totales y los producidos por partículas alfa en cada uno de los cuadros del video.

³Una de las imágenes contiene la totalidad de los eventos registrados, y la segunda los eventos originados por partículas alfa detectados por el *software* desarrollado.

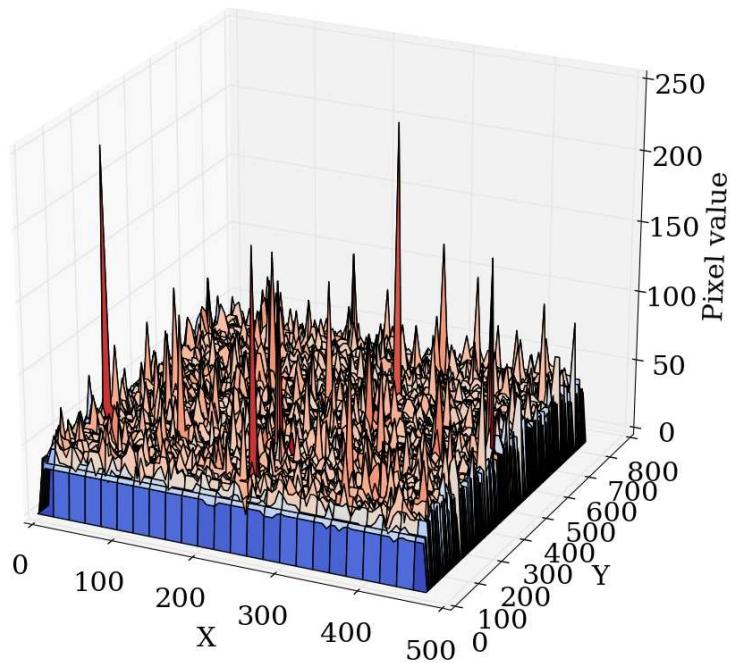


Figura 4.8: Gráfico en tres dimensiones de un cuadro de video [4].

4.4. *Fixed Pattern Noise* y corriente de oscuridad

Para utilizar estos sensores como detectores de partículas cargadas a temperatura ambiente se deben eliminar efectos no deseados como corriente y ruido de oscuridad y el *Fixed Pattern Noise* (FPN). En la Figura 4.8 se muestra un gráfico de malla de los valores obtenidos en uno de los cuadros de un video tomado con el sensor color. Esta imagen fue capturada con el sensor a oscuras y sin ningún tipo de radiación incidente. La mayoría de los píxeles arrojan valores bajos pero no nulos, esto es causado por la corriente de oscuridad. El ruido de oscuridad varía aleatoriamente en cada píxel, y su valor medio aumenta con la temperatura del sensor. En la Figura 4.9 se muestra la evolución del valor medio de todos los píxeles de un sensor en un video de 4000 cuadros. Este video fue capturado utilizando una cámara color que fue colocada dentro de una caja estanca a la luz. Se observó que durante el transcurso de la medición la temperatura de la cámara aumentaba gradualmente, debido a la disipación de calor en el circuito integrado VIMICRO VC0702 que se encarga del procesamiento de imágenes. En el gráfico se observa que a medida que la temperatura del sensor aumenta, el valor medio de los píxeles de los tres colores primarios se eleva. En la Sección 4.4.2 se presentarán resultados cuantitativos de la dependencia de las lecturas con la temperatura. Por otra parte, se observa una oscilación en el valor medio de los píxeles que posee un periodo de aproximadamente 500 cuadros. Esta oscilación es causada por un interlineado que realiza la capturadora de video.

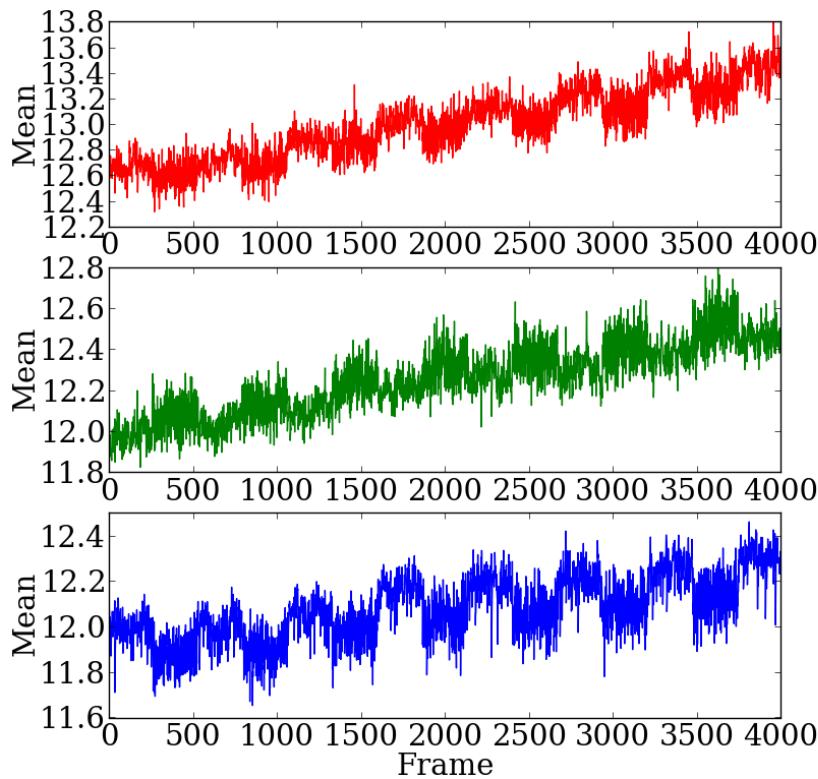


Figura 4.9: Media del valor del los píxeles de los tres colores primarios en un video de 4000 cuadros [4].

Por otra parte, en la Figura 4.8 se observa que existe un reducido numero de píxeles que posee valores muy elevados, notoriamente superiores a la media de la toda la imagen. Esta variabilidad píxel a píxel en la corriente de oscuridad se denomina *Fixed Pattern Noise* (FPN) y está originado por falta de uniformidad en el chip y por píxeles defectuosos. El FPN produce una variación espacial en el valor de la salida de los píxeles de un sensor que no está siendo irradiado ni iluminado. Es una importante fuente de degradación de la calidad de imagen, especialmente en este tipo de sensores de imagen [59].

En la Figura 4.10 se muestran los gráficos que contienen la evolución temporal de las lecturas de dos píxeles diferentes. La Figura 4.10 A muestra los valores correspondientes a la salida de un píxel con alto valor de corriente de oscuridad, se puede observar que la misma posee un valor medio elevado (entre 120 y 140 cuentas) y varía en forma aleatoria. Este píxel forma parte de los que poseen altos valores de FPN y se ve como un pico en la Figura 4.8. La Figura 4.10 B muestra los valores correspondientes a la salida de un píxel con valor bajo de corriente de oscuridad. Se puede ver que su valor medio no es nulo (corriente de oscuridad) ni constante (ruido de oscuridad), pero es mucho más bajo que el del píxel de la Figura 4.10 A y también varía en forma aleatoria. Durante las mediciones realizadas en este trabajo se pudo observar que el FPN aumenta con la temperatura de los sensores y con la dosis recibida por los mismos.

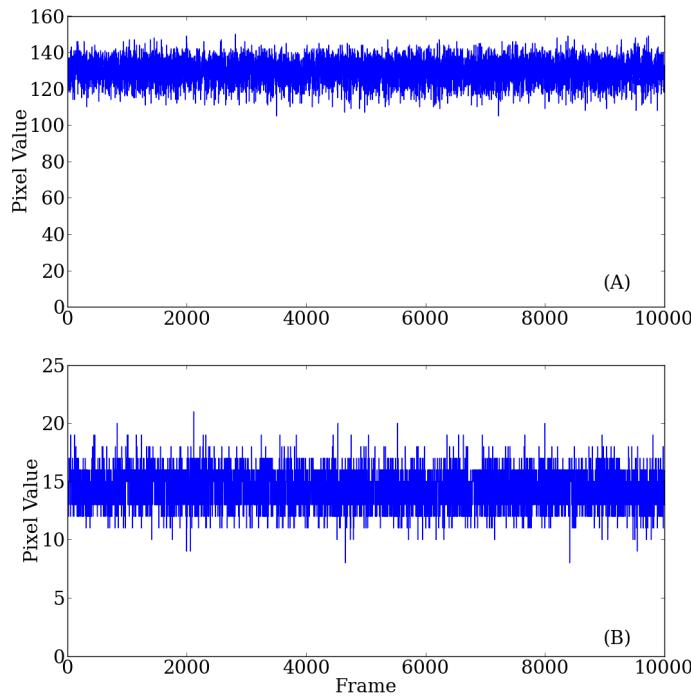


Figura 4.10: A) Valores de un píxel dañado durante un video de 10000 cuadros. B) Valores de un píxel sano durante un video de 10000 cuadros [4].

Como se explicó en la Sección 4.3, la estrategia para detectar eventos que utiliza el software desarrollado es buscar píxeles que posean un valor superior a un umbral U_{ev} . Por lo tanto, si los efectos originados por el FPN y el ruido de oscuridad no son tenidos en cuenta se pueden cometer errores, debido a que píxeles con valores altos pueden ser contados como eventos.

4.4.1. Filtro autorregresivo implementado

Durante el transcurso de este trabajo se evaluaron distintas posibilidades para mitigar la corriente de oscuridad, su distribución (FPN) y el ruido de oscuridad. En primer lugar, se evaluó la posibilidad de tomar el primer cuadro de cada video como imagen de fondo, y utilizarlo para restar al cuadro analizado. Este método no puede ser aplicado debido a que el valor medio de los píxeles sufre una deriva temporal (como se mostró en la Figura 4.9) por ejemplo cuando la temperatura del sensor se incrementa, y la cantidad de píxeles con FPN varía a lo largo de los videos. En segundo lugar, se evaluó la posibilidad de calcular el valor medio de los píxeles del cuadro a analizar para utilizar como fondo. Este método es ineficiente desde el punto de vista computacional. Por otra parte, no es válido debido a que no se estaría tomando en cuenta el efecto del FPN, y luego realizar la resta entre los valores del cuadro y su valor medio, aun

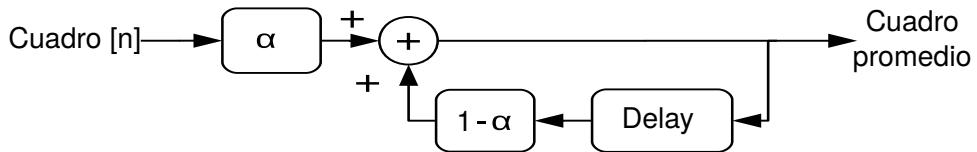


Figura 4.11: Diagrama en bloques del filtro autorregresivo.

podrían existir píxeles por encima del umbral U_{ev} que se confundirían con eventos.

Tanto el valor medio del *Fixed Pattern Noise* como el del ruido de oscuridad, poseen una respuesta temporal muy lenta. Es por eso que se utilizó un filtro autorregresivo pasa-bajos para calcular una matriz (C_{prom}) que posee la suma de ambos valores medios. La matriz C_{prom} se utiliza para restar al cuadro que se desea analizar (C_{leido}) y así extraer el ruido de la imagen. Este algoritmo tiene un bajo coste computacional y puede ser implementado fácilmente en una FPGA o un microprocesador en una futura versión de un instrumento. En la Figura 4.11 se muestra un diagrama en bloques del filtro implementado.

Para realizar el filtrado se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C_{prom}(n) = C_{prom}(n-1).(1-\alpha) + C_{leido}(n).\alpha \quad (4.1)$$

$$C_{filtrado}(n) = C_{leido}(n) - C_{prom}(n) \quad (4.2)$$

Se parte del último valor de la matriz del valor medio ($C_{prom}(n-1)$) y se la multiplica por un factor ($1-\alpha$). Luego, se le suma el valor del cuadro a procesar $C_{leido}(n)$ multiplicado por la constante α . En donde α representa la constante de tiempo del filtro, si se modifica su valor se varía la velocidad de respuesta del filtro. Cuanto menor sea el valor de α , el filtro reaccionará mas lentamente a los cambios en el valor medio del FPN y del ruido de oscuridad. En este caso se utilizó un $\alpha=1/128$, esta elección se debe a que la división por un múltiplo de 2 puede hacerse de manera sencilla en un microcontrolador o una FPGA realizando desplazamientos del número hacia la derecha. Para obtener el cuadro que se utilizará para realizar el posterior procesamiento, se realiza la resta entre el cuadro leído (C_{leido}) y el valor del promedio calculado con el filtro C_{prom} . En la Figura 4.12 se muestra el valor medio de los valores de los píxeles del video analizado en la Figura 4.9 luego de aplicar el filtro autorregresivo. Se observa que cuando el filtro se estabiliza luego de 500 cuadros el valor medio de los cuadros del video es cero, y que se eliminan las oscilaciones producidas por el interlineado.

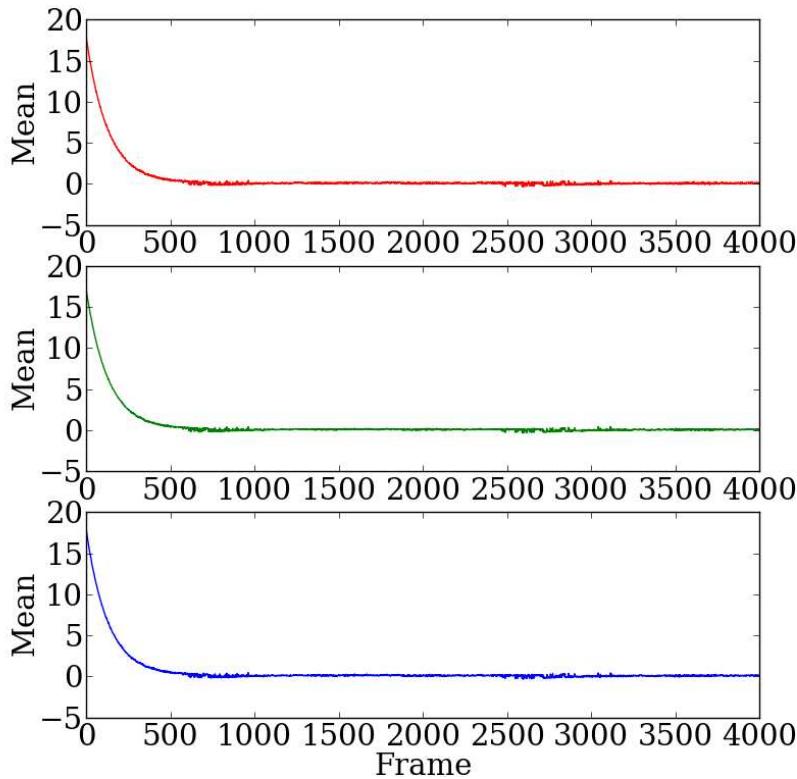


Figura 4.12: Media del valor del los píxeles de los tres colores primarios en un video de 4000 cuadros luego de aplicar el filtro autorregresivo implementado [4].

4.4.2. Análisis de la distribución estadística del valor de los píxeles

Con el fin de caracterizar con mayor detalle el ruido presente en los sensores se realizó un estudio de la distribución estadística de los píxeles de ambos modelos. Para esto se capturaron videos sin someter a los sensores a ningún tipo de radiación, y manteniendo la temperatura constante. Se utilizaron dos valores de temperatura (20° y 40° C) para estudiar el efecto que origina el incremento de la misma en el valor medio del ruido de oscuridad y el FPN. Luego de capturar los videos se realizó un programa para almacenar en un archivo de texto el valor de todos los píxeles registrados por los sensores. En las Figuras 4.13 y 4.14 se muestran los gráficos de los histogramas de la distribución de todos los píxeles para ambos modelos de sensores en 36.000 cuadros de vídeo. En cada uno de los gráficos se muestran cuatro curvas, dos de las mismas (gris y celeste) corresponden a las distribuciones estadísticas de los píxeles a 20° y 40° C sin utilizar el filtro autorregresivo. Las dos curvas restantes (negra y azul) corresponden a la distribución estadística de los píxeles para 20° y 40° C luego de aplicar el filtro. En ambos gráficos se puede observar que cuando no se utiliza el filtro, la media de las distribuciones se incrementa con la temperatura. Por otra parte, cuando el filtro es aplicado la media de las distribuciones se mantiene en cero sin importar el valor de la temperatura a la que se encuentren los sensores. Dentro de las circunferencias indicadas

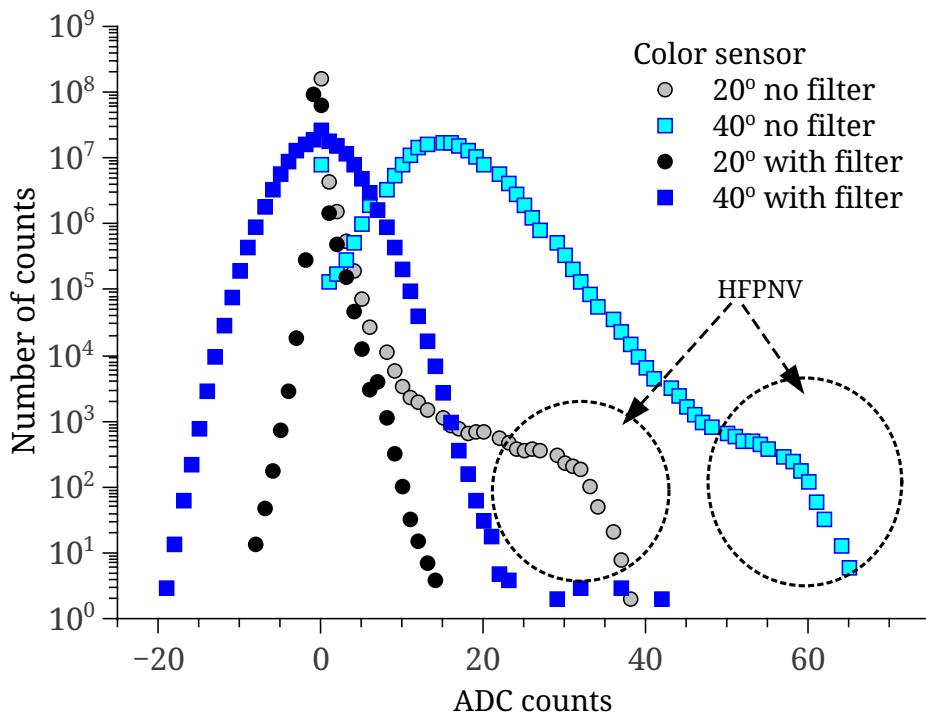


Figura 4.13: Distribución estadística de los píxeles de un sensor color en 36000 cuadros de video. Las imágenes fueron tomadas a temperaturas de 20° y 40° C. Se muestran los resultados antes y después de la aplicación del filtro autorregresivo [3].

con la sigla “HFPNV”, se muestran los píxeles que poseen valores elevados que son originados por el FPN. Se puede observar que luego de aplicar el filtro autoregresivo la cantidad de píxeles con valor superior a 25 en el sensor color y 60 en el sensor blanco y negro es prácticamente nula. Como fue explicado en la Sección 4.3, para identificar los eventos en un cuadro de video uno o mas píxeles deben superar un umbral U_{ev} . Teniendo en cuenta el análisis realizado, se puede decir que si se aplica un umbral U_{ev} mayor a 25 para las cámaras color y mayor a 60 en los sensores blanco y negro, no se registrarán falsos positivos producidos por ruido de oscuridad o FPN.

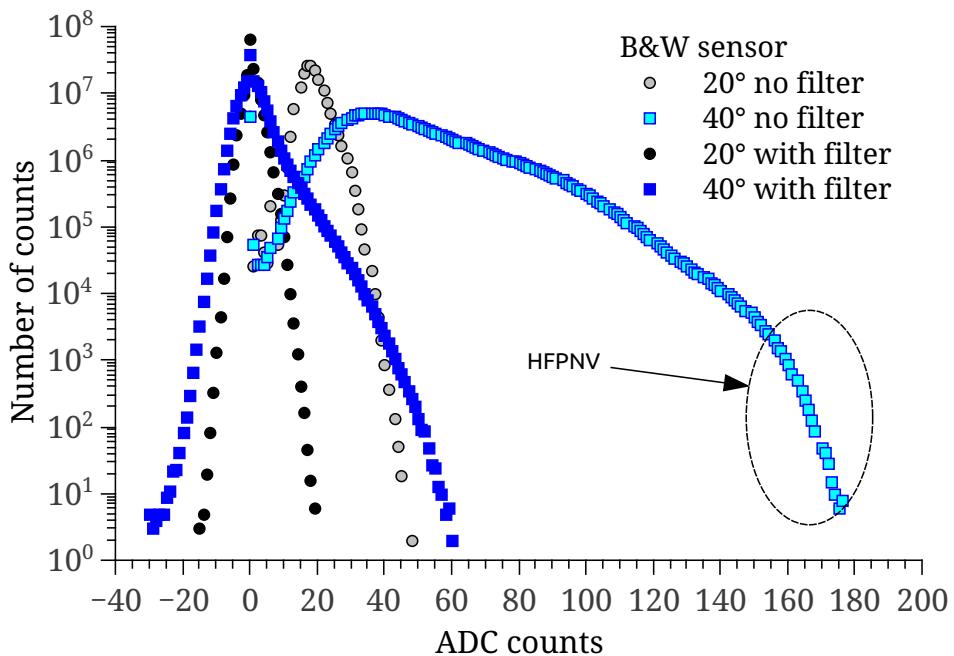


Figura 4.14: Distribución estadística de los píxeles de un sensor blanco y negro en 36000 cuadros de video. Las imágenes fueron tomadas a temperaturas de 20° y 40° C. Se muestran los resultados antes y después de la aplicación del filtro autorregresivo [3].

4.5. Sumario del capítulo

En este capítulo se describieron las cámaras utilizadas en este trabajo, y el esquema experimental que se empleó para capturar los videos durante las irradiaciones realizadas. Luego, se explicó el funcionamiento del *software* desarrollado para el análisis de los videos. Por último, se realizó un análisis del *Fixed Pattern Noise* y ruido de oscuridad presentes en los sensores utilizados. Se explicó porque se deben eliminar y se describió el funcionamiento del filtro autorregresivo diseñado para tal fin. En la Sección 4.4.2 se estudió la distribución estadística del valor de los píxeles de los sensores. Este análisis se utilizó para demostrar la eficiencia del filtro autorregresivo en la reducción del FPN y el ruido de oscuridad. En el siguiente capítulo se describirán las mediciones realizadas con esta técnica de detección y se analizarán los resultados obtenidos.

Capítulo 5

Mediciones realizadas y análisis de resultados

En este capítulo se describirán las mediciones realizadas con el fin de caracterizar la respuesta de los sensores a la radiación ionizante. En primer lugar, se realizará una descripción de las irradiaciones realizadas con fuentes de calibración gamma, rayos X, partículas beta, y partículas alfa. Luego, en la Sección 5.1.1, se analizará la forma de los eventos generados por los distintos tipos de radiación. En la Sección 5.1.2, se efectuará un análisis de la carga depositada en el sensor por las diferentes partículas, y en la Sección 5.1.3 se estudiarán parámetros geométricos de los eventos generados por las mismas.

En la Sección 5.2 se estudiará el desempeño de los sensores como contadores de partículas. Este tipo de dispositivos se podría utilizar para el diseño de un detector de radiación, que podría inferir la dosis recibida contando la cantidad de eventos detectados. Para evaluar si este tipo de sensores puede ser utilizado en esta aplicación, se llevaron a cabo irradiaciones con una fuente de calibración gamma de ^{137}Cs , y en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor Nuclear de Investigación RA6 del Centro Atómico Bariloche. Estos experimentos fueron realizados para evaluar la relación existente entre el número de eventos registrados y la dosis gamma recibida, y por otra parte, para estudiar la respuesta de los sensores a diferentes tasas de dosis.

Por último, en la Sección 5.3 se verificará la capacidad de este tipo de sensores para detectar partículas alfa en campos de radiación mixtos. En primer lugar, se describirá un algoritmo desarrollado en el marco de este trabajo, que utiliza las características geométricas de los eventos, y la carga producida en el sensor, para evaluar si dichos eventos son originados por partículas alfa. En esta sección también se describirá un experimento realizado en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6, en el que se buscaba probar la eficiencia del algoritmo para la discriminación de partículas alfa. En el experimento los sensores fueron sometidos a un campo mixto de partículas



Figura 5.1: Fuentes radioactivas utilizadas.

alfa y rayos gamma.

5.1. Mediciones con fuentes de radiación alfa, beta, X y gamma

Con el fin de caracterizar cualitativamente la respuesta de los sensores a distintos tipos de radiación ionizante se realizaron irradiaciones con diversas fuentes radioactivas. Se utilizó el esquema experimental descripto en la Sección 4.2. Las cámaras se colocaron dentro de una caja estanca a la luz, en donde también se ubicaron las fuentes radioactivas. Se utilizó una capturadora de video para digitalizar y enviar a una PC las señales de video producidas por las cámaras. Las señales digitalizadas fueron adquiridas en la PC con un puerto USB y se almacenaron los archivos de video en el disco rígido.

En estas irradiaciones se buscó que la distancia entre las fuentes y los sensores fuera de unos pocos milímetros ($\cong 5\text{mm}$), debido a que a distancias mayores se registraban muy pocos eventos en los videos. Se realizaron irradiaciones con una fuente de rayos X de ^{55}Fe , y con fuentes de calibración gamma de ^{60}Co , ^{241}Am , ^{133}Ba y ^{152}Eu . Para irradiar a los sensores con partículas α se emplearon fuentes de ^{241}Am y ^{235}U con una capa de protección muy delgada que permite que este tipo de partículas pueda escapar. Por otra parte, se analizó la respuesta de los sensores a partículas β , para lo cual se utilizó una fuente de calibración de ^{137}Cs . En la Figura 5.1 se muestran imágenes de las diversas fuentes radioactivas utilizadas. En las Secciones 5.1.1, 5.1.2, y 5.1.3 se discutirán los resultados de estas mediciones.

5.1.1. Análisis de los eventos registrados con diversas fuentes radioactivas

Como fue explicado en la Sección 3.3, cuando una partícula ionizante interactúa con el sensor pierde su energía generando carga de ionización en un conjunto de píxeles. Como resultado se observa una región iluminada en la imagen registrada por el sensor. En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran los patrones típicos dejados por diferentes

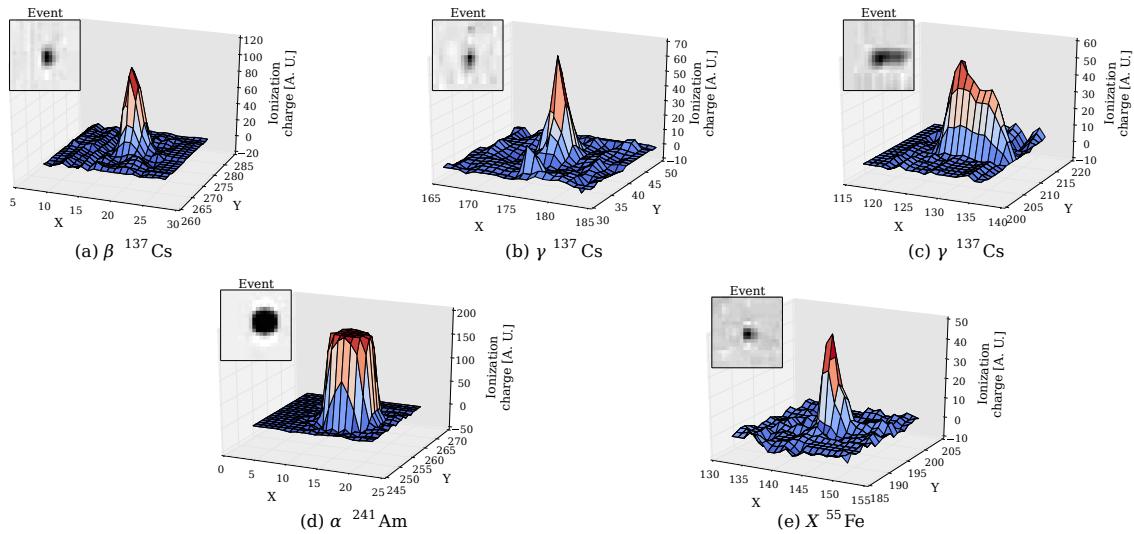


Figura 5.2: Gráficos en tres dimensiones de los diferentes tipos de eventos colectados por un sensor color [3].

partículas sobre el sensor color y el blanco y negro, respectivamente. Los gráficos en tres dimensiones muestran los valores del conjunto de píxeles que conforman un evento¹. Los insertos en cada uno de los gráficos muestran la forma en la que se ven dichos eventos en el video capturado.

5.1.1.1. Partículas beta

Las partículas beta son electrones que se producen por decaimientos radioactivos [1]. Durante un decaimiento beta un neutrón se convierte en un protón, y el núcleo del átomo libera un electrón energético y un neutrino. La mayoría de los emisores beta decaen a un estado excitado hijo que libera su exceso de energía mediante un fotón gamma. Las Ecuaciones 5.1 y 5.2 representan el principal modo de decaimiento de un núcleo de ^{137}Cs :



El ^{137}Cs decae en $^{137}\text{Ba}^*$ emitiendo partículas β de hasta 1.173 MeV, con un porcentaje del 94.6 %. A su vez, el $^{137}\text{Ba}^*$ decae a su estado estable emitiendo un fotón gamma de 0.66 MeV. En su segundo modo de decaimiento, el ^{137}Cs decae en ^{137}Ba emitiendo partículas β de hasta 1.174 MeV, esto ocurre con un porcentaje del 5.4 % [60].

¹Los valores graficados corresponden a la matriz M_{ev} descripta en la Sección 4.3

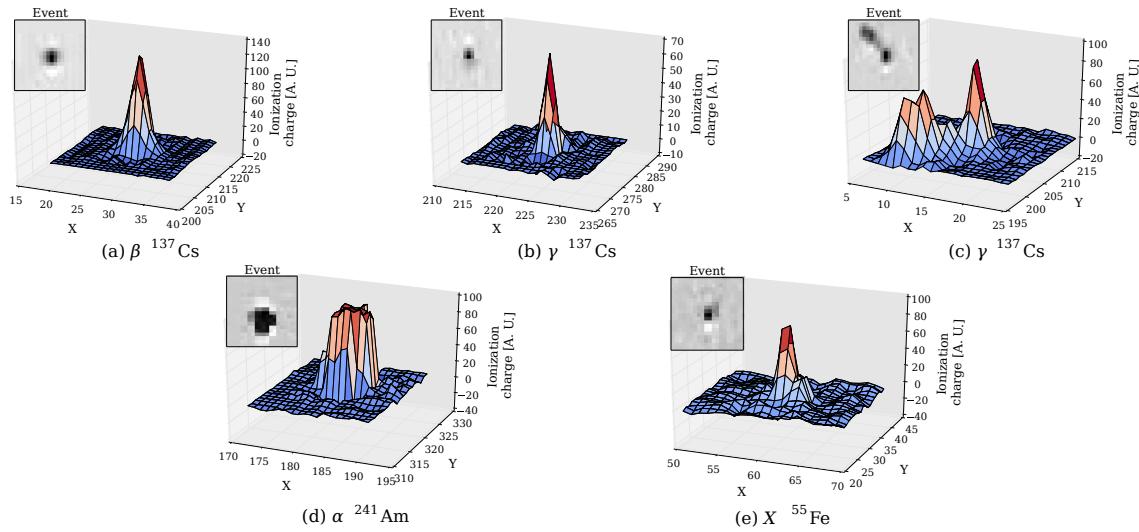


Figura 5.3: Gráficos en tres dimensiones de los diferentes tipos de eventos colectados por un sensor blanco y negro [3].

En una de las irradiaciones descriptas en la Sección 5.1, los sensores de imagen se colocaron a aproximadamente 5 mm de una fuente de ^{137}Cs . La longitud de atenuación en silicio de los gamma emitidos por el ^{137}Cs ($\cong 3.7\text{ cm}$) es mucho mayor que el espesor de la zona activa del sensor, por esta razón, sólo una muy pequeña fracción de los fotones gamma incidentes interactúa con el volumen activo del sensor [14][61]. Además, como la energía es suficientemente alta como para atravesar las capas de aislantes que recubren al chip, prácticamente todas las partículas beta generarán carga en la región activa de los píxeles.

La cantidad de partículas beta emitidas durante el decaimiento del ^{137}Cs es prácticamente igual a la cantidad de fotones gamma. Por otra parte, la mayoría de las partículas beta incidentes sobre el sensor interactuarán con él, mientras que como se dijo, el número de interacciones de fotones será relativamente bajo (menor al 0.1 %). Por lo tanto, se puede suponer que la mayoría de eventos registrados durante las irradiaciones con esta fuente son originados por partículas beta. Para comprobar esta afirmación, se colocó una lámina de acrílico de 5 mm de espesor entre el sensor y la fuente radioactiva. El rango de electrones de 1.2 MeV en acrílico es de 4,96 mm por lo que la capa de este material colocada entre la fuente y el sensor debería blindar en su totalidad a este tipo de partículas. Para comprobar que el acrílico no atenuaba los rayos gamma se realizó un experimento de transmisión utilizando un centellador de NaI. En la Figura 5.4 se muestran los espectros capturados con el centellador, para la fuente de ^{137}Cs con y sin la capa de acrílico, donde puede verse que ambos espectros no presentan diferencias significativas. Por otra parte, en la Figura 5.5 se muestran las imágenes de todos los

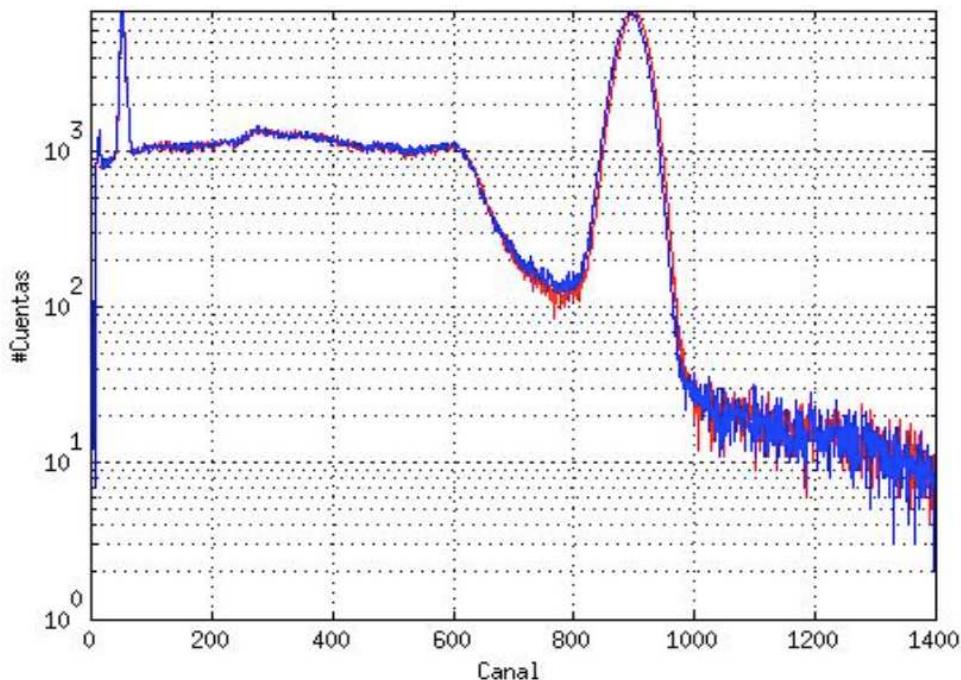


Figura 5.4: Espectro de una fuente de ^{137}Cs tomado con un centellador de NaI, sin interponer el acrílico de 5 mm de grosor entre la fuente y el centellador (curva azul) y con la presencia del acrílico (curva roja).

eventos registrados en 4000 cuadros de video con y sin la capa de acrílico. Se puede observar que la diferencia en el número de eventos registrados es considerable. En el video tomado sin la capa de acrílico se registraron 5092 eventos, mientras que en el video tomado con la capa de acrílico se registraron 198. De esta forma, se demuestra la hipótesis de que la mayoría de eventos detectados son producidos por partículas beta. Por lo explicado anteriormente, la cantidad de eventos generados por fotones gamma debería ser menor al 0,01 % de los eventos registrados sólo con partículas beta. Como puede observarse, la cantidad de eventos producidos por fotones gamma es mayor a la esperada, esto puede deberse a electrones secundarios generados en la capa aislante con la que están recubiertos los píxeles. Las formas típicas de los eventos originados por estas partículas se muestran en las Figuras 5.2 a y 5.3 a.

En otra irradiación, los sensores fueron expuestos a partículas beta de 356 keV y rayos gamma con energías por debajo de 1408 keV provenientes de una fuente de ^{152}Eu [60]. La forma de los eventos registrados fue similar a los del ^{137}Cs en ambos tipos de sensores.

5.1.1.2. Fotones X y Gamma

Los rayos X son fotones con un rango de energías que va desde algunas decenas de electronvoltios hasta cientos de kiloelectronvoltios. Los rayos X de 100 eV a 100 keV pueden interactuar con el silicio principalmente por dos efectos: fotoeléctrico y Com-

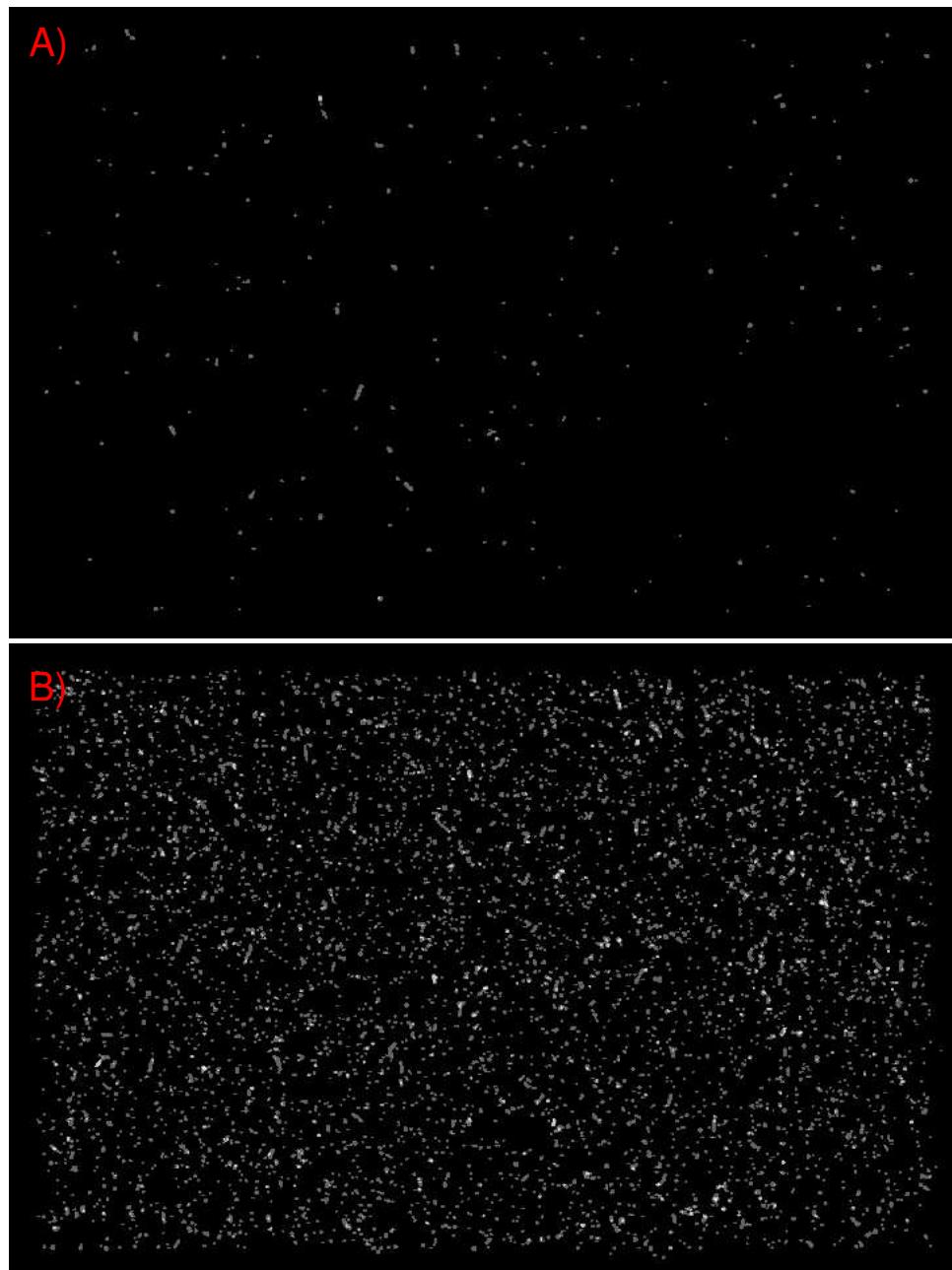


Figura 5.5: Imágenes de todos los eventos registrados por un sensor color irradiado con una fuente de ^{137}Cs en 4000 cuadros de video. Con un acrílico de 5 mm entre la fuente y el sensor (A) y sin acrílico (B).

pton. El efecto dominante depende de la energía del fotón y la masa atómica [1]. Para evaluar el funcionamiento de los sensores con este tipo de radiación se utilizó una fuente de ^{55}Fe . Este radioisótopo decae a ^{55}Mn por captura electrónica emitiendo fotones de 5,90 keV y 6,5 keV, que tienen un rango de penetración en silicio de $28\ \mu\text{m}$ y $38\ \mu\text{m}$ respectivamente [62][61]. Por lo tanto, la mayoría de estos fotones llegan a el área activa de sensor. El efecto de interacción dominante es el fotoeléctrico, en donde los electrones de silicio absorben la totalidad de la energía de los fotones. En las Figuras 5.2 (e) y 5.3 (e) se muestran las formas típicas de los eventos originados por este tipo de radiación.

Para rayos gamma con energías superiores a 100 keV la interacción con el silicio está dominada por el efecto Compton. A diferencia del efecto fotoeléctrico, en el efecto Compton sólo una fracción de la energía del fotón incidente se transfiere al electrón. El fotón absorbido genera un electrón de alta energía y otro fotón, que son expulsados en diferentes ángulos para conservar el momento y la energía [26]. En las Figuras 5.2 (b) y 5.3 (b) se presentan eventos típicos capturados en los sensores durante una irradiación con fotones gamma de una fuente de ^{137}Cs . En estos eventos, la trayectoria de los electrones generados es casi perpendicular a la superficie del sensor, es por eso que su forma se asemeja a la de un círculo. Las Figuras 5.2 (c) y 5.3 (c) presentan otro caso menos frecuente, en la que se observa una traza, este efecto puede ser el resultado de un electrón generado en una dirección normal o casi paralela con respecto a la superficie activa del chip. Las fuentes de ^{60}Co y ^{133}Ba que se utilizaron en las irradiaciones poseen un blindaje que no deja escapar a las partículas beta. Por lo que en estos casos, los sensores se irradiaron con fotones gamma de 1.173 MeV, 1.332 MeV (^{60}Co) y 383.9 keV(^{133}Ba) [60]. La forma de los eventos detectados con estas fuentes fue similar a los que se registraron con la fuente de ^{137}Cs .

5.1.1.3. Partículas alfa

Como se detalló en la Sección 5.1 se utilizaron dos fuentes de ^{241}Am y una de ^{235}U para observar la respuesta de los sensores a las partículas alfa. El radioisótopo ^{241}Am emite partículas alfa con energías de 4.4 MeV y rayos X de 60 keV [60]. Una de las fuentes de ^{241}Am tiene un blindaje que detiene las partículas alfa, mientras que la otra fuente tiene solamente una capa de protección muy delgada, lo que permite la emisión de este tipo de partículas².

La distancia entre la fuente y los sensores fue de menos de 5 mm con el fin de asegurar que las partículas alfa llegaran al sensor sin detenerse en el aire. Con la fuente sin blindaje se detectaron dos grupos diferentes de eventos: Un primer grupo similar a los patrones observados con rayos X, y un segundo tipo de eventos generalmente más grandes como los observados en la primeras pruebas con radiación (Sección 3.4). En las

²Para simplificar el texto partir de ahora a esta fuente se la llamará “sin blindaje”.

Figuras 5.2 (d) y 5.3 (d) se muestran los gráficos de este último grupo de eventos, el radio de los mismos es mayor a los originados por partículas beta y su forma se asemeja a la de un círculo. Por otra parte, se observó que generalmente el valor máximo de estos eventos es superior al de los originados por fotones gamma, X, y partículas beta. En el caso del sensor color, se puede observar que en el gráfico del evento existen píxeles que llegan a su valor máximo produciéndose una saturación de los mismos. El mismo experimento se llevó a cabo utilizando una fuente de ^{235}U , que emite partículas alfa de 4.679 MeV. Se obtuvieron resultados similares a los descriptos anteriormente.

5.1.2. Análisis de colección de carga

Luego de realizar las irradiaciones con todas las fuentes radioactivas, los videos obtenidos fueron procesados con el *software* desarrollado aplicando el algoritmo de supresión de FPN. Dentro de los parámetros calculados para cada evento, se encuentra el valor de la suma de todos los píxeles dentro de la matriz M_{ev} al que se llamó V_{suma} (Sección 4.3). El valor de V_{suma} es proporcional a toda la carga colectada en el volumen activo del detector después de cada evento, es decir, una medida en unidades arbitrarias (cuentas del conversor ADC) de toda la carga recogida.

Las Figuras 5.6 y 5.7 muestran los histogramas de la cantidad de eventos detectados en función de los valores de carga colectada (V_{suma}) para ambos sensores. En los gráficos 5.6 y 5.7 A, se muestran los histogramas obtenidos luego de las irradiaciones con las fuentes de ^{241}Am y ^{235}U sin blindaje. Ambas fuentes emiten fotones gamma y partículas alfa. En los gráficos 5.6 y 5.7 B y C, se muestran los histogramas obtenidos luego de procesar los videos capturados en las irradiaciones con las fuentes que emiten partículas beta, fotones gamma y rayos-X.

A pesar de que los sensores fueron irradiados con fotones en un rango muy amplio de energías, los histogramas poseen mucha dispersión, y no se observan diferencias en la colección de carga para las diferentes fuentes de calibración gamma. Se puede ver también, que los histogramas correspondientes a las fuentes de ^{55}Fe , ^{137}Cs y ^{152}Eu son similares a los calculados para las fuentes de calibración gamma de ^{241}Am (blindada), ^{60}Co y ^{133}Ba . Por lo tanto, la carga colectada en el sensor es similar para eventos producidos por fotones gamma, X, y partículas beta.

Por otra parte, existe una diferencia clara entre los histogramas calculados para las fuentes que emiten partículas alfa (5.6 y 5.7 A) y los del resto de las fuentes. En el caso del ^{241}Am sin blindaje y el ^{235}U existen eventos que depositan una mayor cantidad de carga en los sensores. Se puede deducir que estos eventos son originados por partículas alfa, si se compraran los histogramas correspondientes a las fuentes de ^{241}Am con blindaje y sin blindaje. En el caso del sensor blanco y negro (Figura 5.6), se produce un gran numero de eventos que depositan valores de carga de entre 1500 y

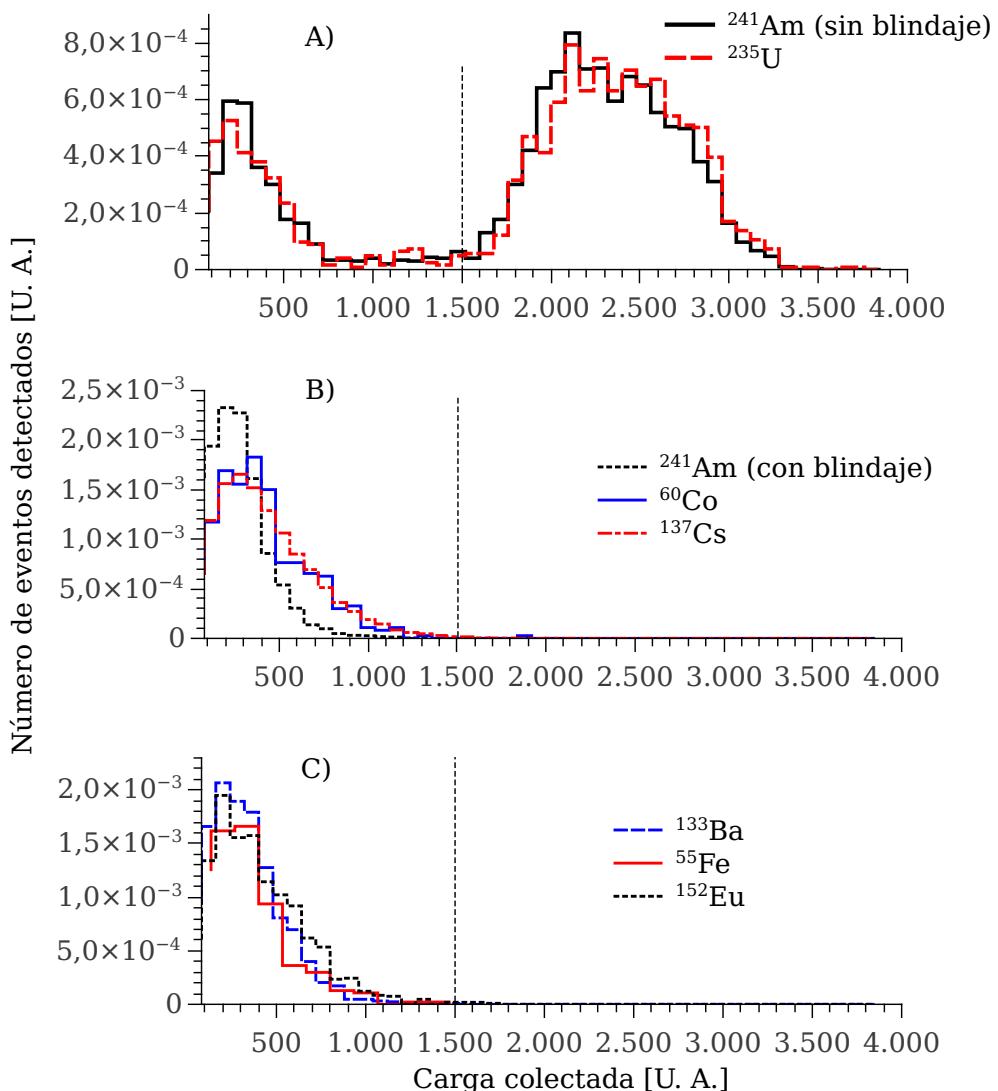


Figura 5.6: Histogramas de la cantidad de eventos detectados en función de los valores de carga colectada para un sensor blanco y negro. **A)** Fuentes de ^{241}Am y ^{235}U ($\alpha + \gamma$). **B)** Fuentes de ^{60}Co , ^{241}Am (blindaje) (γ) y ^{137}Cs ($\gamma+\beta$). **C)** Fuentes de ^{133}Ba (γ), ^{55}Fe (X), ^{152}Eu ($\gamma+\beta$) [3].

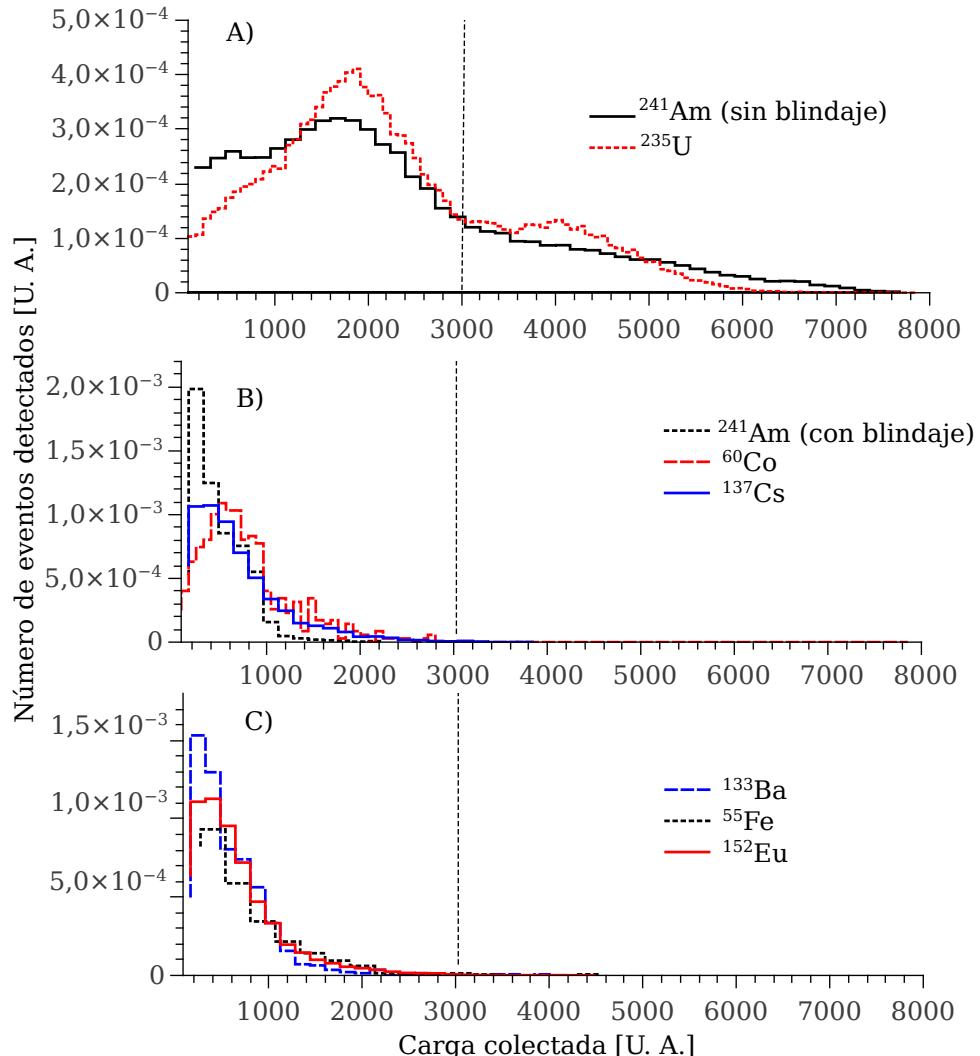


Figura 5.7: Histogramas de la cantidad de eventos detectados en función de los valores de carga colectada para un sensor color. **A)** Fuentes de ^{241}Am y ^{235}U ($\alpha + \gamma$). **B)** Fuentes de ^{60}Co , ^{241}Am (blindada) (γ) y ^{137}Cs ($\gamma + \beta$). **C)** Fuentes de ^{133}Ba (γ), ^{55}Fe (X), ^{152}Eu ($\gamma + \beta$) [3].

3000 u.a. Este pico sólo se produce con la fuente de ^{241}Am que emite partículas alfa. Para las cámaras color, que utilizan un filtro de Bayer, se puede observar que hay un gran número de eventos que depositan valores de carga superiores a 3000 u.a., esto no ocurre con la fuente de ^{241}Am blindada. Por lo tanto, los eventos que dejan mayores niveles de carga en los píxeles se pueden asociar a las partículas alfa, que tienen un mayor *Linear Energy Transfer* (LET). Si se realiza una comparación de los picos de las Figuras 5.6 A y 5.7 A se podría suponer que la interacción de las partículas alfa con el filtro de Bayer podría modificar la cantidad de carga recogida por el sensor.

Teniendo en cuenta que en el silicio se requiere un promedio de 3,6 eV para crear un par electrón-hueco, cada fotón incidente de 6,5 keV del ^{55}Fe generará aproximadamente 1800 pares. Si el fotón es absorbido cerca de la zona de vaciamiento del píxel una alta fracción de la carga es colectada en la juntura. Esta carga atrapada en un conjunto de píxeles vecinos conduce a los histogramas de las Figuras 5.6 y 5.7 C. Se puede observar que en el sensor de color, el pico de colección de carga se encuentra en 500 u.a., mientras que en el blanco y negro el pico se encuentra en 250 u.a. Por otra parte, las partículas beta del ^{137}Cs tienen una energía de 0,514 MeV y 1.176 MeV, que es mayor a la de los fotones de ^{55}Fe . Sin embargo, se puede observar que la cantidad de carga depositada en ambos casos es similar. Las partículas beta de alta energía del ^{137}Cs tienen un LET de 1,5 a 1,6 MeV cm²/g, por lo menos diez veces menor que el de los electrones generados por efecto fotoeléctrico. Con ese LET, las partículas beta emitidas por el ^{137}Cs pueden generar ≈ 100 pares/ μm . Por lo tanto, en una distancia de $\approx 18 \mu\text{m}$ se generarán aproximadamente 1800 pares, que es la misma cantidad de carga producida por un fotón X proveniente de la fuente de ^{55}Fe . Esta distancia es comparable con el espesor de las capas epitaxiales de los procesos CMOS, en trabajos publicados en la bibliografía donde se estudian mecanismos de interacción de partículas con circuitos electrónicos, se observó que en tal profundidad es donde se colecta la mayor cantidad de carga luego de un *Single Event effect* [63].

Por otra parte, como se observa en las Figuras 5.6 y 5.7 A, es evidente que las partículas alfa generan una mayor cantidad de carga que las partículas beta o los electrones. Este resultado puede ser explicado por la diferencia en los LET de las partículas. Sin embargo, debido a que se observa una saturación de los píxeles en eventos generados por partículas alfa (probablemente en los preamplificadores de cada píxel), no es posible realizar una comparación cuantitativa de las diferencias en la carga depositada.

5.1.3. Tamaño de los eventos registrados

Los fotones X producidos por la fuente de ^{55}Fe tienen energías de 5,9 y 6,5 keV [60]. Luego de la interacción de estos fotones con el silicio se generan electrones, principal-

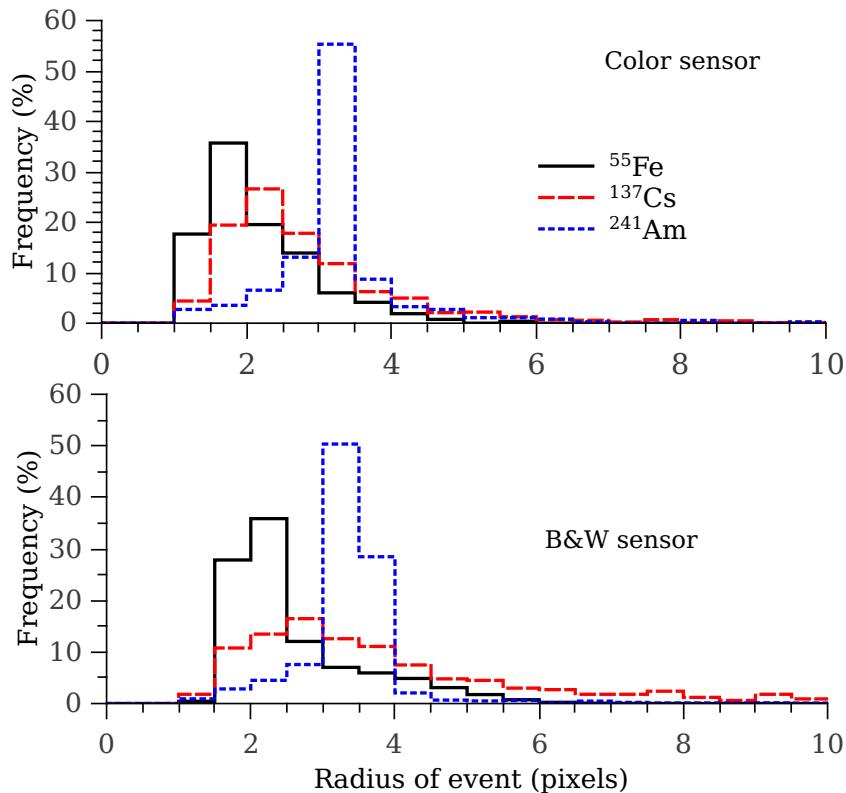


Figura 5.8: Histogramas del radio de los eventos registrados por ambos modelos de sensores para diferentes fuentes radioactivas [3].

mente por efecto fotoeléctrico. Los mismos poseen energías por debajo de 6,5 keV, y un rango menor a los $2 \mu\text{m}$, dicho rango, es menor que el tamaño de un píxel [64]. Existe la posibilidad de que se generen fotones secundarios dentro del silicio (cuya energía es de 1,7 KeV, y que poseen una distancia de atenuación de $\approx 11 \mu\text{m}$), originados por efecto fotoeléctrico [65]. Estos fotones a su vez pueden generar otro electrón con un corto rango. Esto significa, que la mayor parte de las veces toda la carga generada por la absorción de un fotón de rayos X debería ser colectada en una región más pequeña que el tamaño lateral de un píxel. Sin embargo, la carga depositada después de un evento se propaga en un grupo de varios píxeles (como fue estudiado en la Sección 5.1.1). En la Figura 5.8 se muestran los histogramas del radio de los eventos registrados por ambos modelos de sensores para diferentes tipos de radiación. Estos radios se calcularon con los segundos momentos de inercia de cada evento. Se puede observar que en la mayoría de los eventos producidos por la fuente de ^{55}Fe , el radio es cercano a los dos píxeles, tanto para el sensor color como para el blanco y negro.

Se puede concluir que, a pesar de que un fotón genera carga en una superficie menor a la de un píxel, los eventos producidos por este tipo de partícula afectan a una superficie de 100 a $200 \mu\text{m}^2$. En trabajos anteriores, se observaron eventos de tamaño similar generados por rayos X, en sensores de imagen CMOS con tamaños de píxeles de $5,6 \mu\text{m} \times 5,6 \mu\text{m}$ [16] [17]. Este resultado puede ser explicado por las siguientes

razones: Los fotones de ^{55}Fe tienen longitudes de penetración de entre 28 y $38\,\mu\text{m}$, mientras que la zonas de vaciamiento de las uniones PN de los píxeles CMOS tienen una profundidad inferior a $1\,\mu\text{m}$ desde la interfaz con el óxido de silicio. Esto significa, que la mayor parte de los fotones son absorbidos por el silicio debajo de la zona de vaciamiento de los fotodiodos. Cuando el fotón es absorbido, se genera en una región de unos pocos μm en la que existe una alta densidad de pares electrón-hueco. Esta carga, generada por debajo de un píxel se extiende a los píxeles vecinos por difusión, generando el evento observado. Este efecto es conocido por causar *crosstalk* en sensores de imagen, cuando los mismos son irradiados con luz visible [66][67][68].

Los tamaños de los eventos generados por partículas alfa son ligeramente más grandes, con un radios de entre 33 y $44\,\mu\text{m}$. En un trabajo anterior se reportaron resultados similares con sensores de imagen CCD, en donde el radio de los eventos alfa para energías similares era de aproximadamente dos píxeles. Dichos resultados fueron explicados en términos de efecto plasma dentro del silicio. En los sensores utilizados en ese trabajo la separación entre píxeles era de $15\,\mu\text{m}$, obteniéndose un radio de $30\,\mu\text{m}$ [42].

5.2. Desempeño de los sensores como contadores de partículas

En esta sección se analizará el desempeño de los sensores como contadores de partículas. Este tipo de dispositivos se podría utilizar para el diseño de un detector de radiación, que podría inferir la dosis recibida contando la cantidad de eventos detectados luego de la supresión del FPN. En primer lugar, se realizará un análisis del criterio para la elección del umbral U_{ev} que se utiliza para verificar la existencia de un evento. La elección de U_{ev} es de suma importancia para esta aplicación, debido a que afecta a la sensibilidad y la resolución de los detectores basados en esta técnica. Luego, se describirá el esquema experimental y los resultados de una irradiación realizada con una fuente de calibración gamma de ^{137}Cs . Esta irradiación se realizó con el objetivo de estudiar la relación existente entre el número de eventos registrados en los sensores y la dosis gamma recibida. Por último, se describirá el esquema experimental y los resultados de un experimento en el que los sensores fueron irradiados utilizando el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor Nuclear de Investigación RA6 del Centro Atómico Bariloche. Estas irradiaciones se efectuaron con el fin de estudiar la capacidad de los sensores para contar partículas a diferentes tasas de dosis.

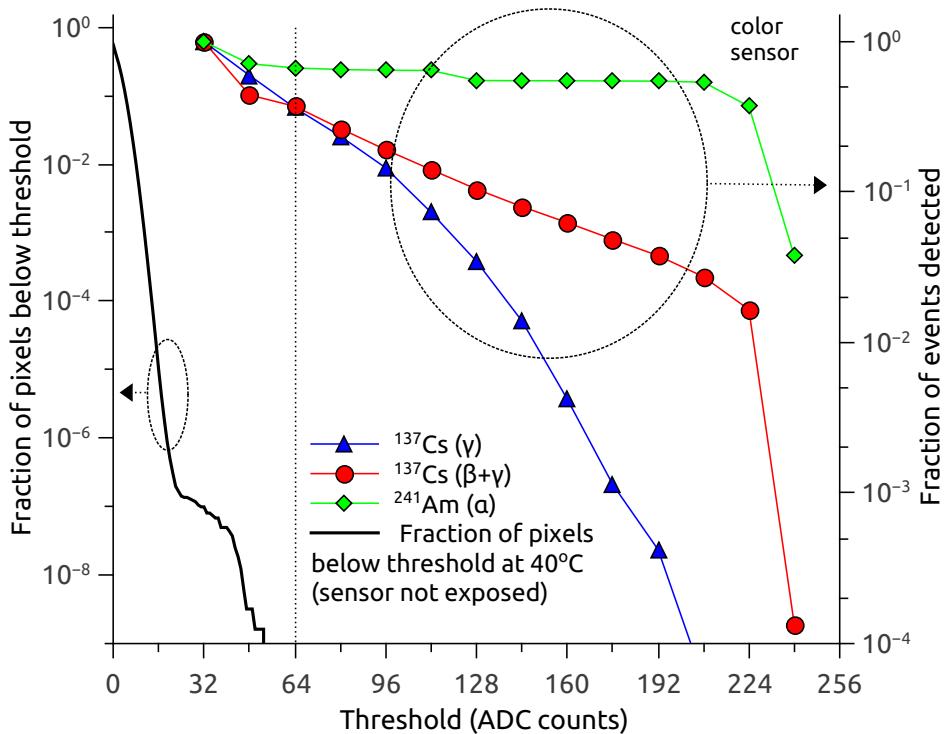


Figura 5.9: Izquierda: fracción de píxeles cuyo valor es menor a un umbral. La curva se puede interpretar como una estimación de la probabilidad de que un píxel de la imagen elegido al azar produzca una cuenta espuria. Derecha: número de eventos detectados por los sensores color en función del umbral utilizado [3].

5.2.1. Análisis de la elección del umbral U_{ev}

Como se mencionó en la Sección 4.3 la elección del umbral U_{ev} (con el que se compara al máximo de la matriz M_{cuadro} para verificar si existe un evento), es de suma importancia. Si el valor del umbral utilizado es demasiado bajo, el ruido de oscuridad produciría cuentas indeseadas (falsos positivos). Por otro lado, si el umbral es demasiado alto, no se registrarían muchos eventos, esto conduciría a una mala capacidad de respuesta y una resolución baja. Por lo tanto, en la elección del valor del umbral, debe existir una relación de compromiso entre la tasa de cuentas espurias, y la tasa de eventos no registrados. Esta relación de compromiso se ejemplifica en la Figura 5.9, la línea continua de la izquierda, muestra la fracción de píxeles (eje vertical izquierdo) cuyo valor es menor a un umbral. La curva se puede interpretar como una estimación de la probabilidad de detección en función del umbral (eje x), de que un píxel de la imagen elegido al azar produzca una cuenta espuria indeseada³.

En la parte derecha de la Figura 5.9, se muestran tres curvas que relacionan el número de eventos detectados por los sensores color (eje vertical derecho) con el umbral utilizado. La curva de color verde, corresponde a eventos originados por partículas alfa provenientes de una fuente de ^{241}Am , la curva azul corresponde a eventos originados

³Los valores de la curva fueron calculados luego de utilizar el algoritmo para la supresión del FPN y con el sensor a una temperatura de 40° C.

por fotones gamma provenientes de una fuentes de ^{137}Cs , mientras que la curva roja corresponde a eventos originados por partículas beta y fotones gamma provenientes de una fuente de ^{137}Cs . Para poder realizar una comparación entre el numero de eventos registrados con las tres fuentes, el número de eventos de cada una de las curvas fue normalizado, dividiendo por la cantidad de eventos totales registrados con un umbral de 32. En las curvas se puede apreciar que el número de partículas detectadas depende en gran medida del umbral utilizado. Esta relación se aprecia especialmente en los eventos producidos por radiación gamma, en donde existen casi ocho órdenes de magnitud entre el número de eventos detectados con un umbral de 32 y el número de eventos detectados con un umbral de 192. Para el procesamiento de los videos se utilizó un umbral U_{ev} de 64. Si se observan las curvas de la Figura 5.9 se puede apreciar que para este valor, la posibilidad de tener un falso positivo es prácticamente nula, y la cantidad de eventos detectados no desciende significativamente, si se la compara con el número obtenido utilizando un umbral de 32.

5.2.2. Respuesta de los sensores a fotones gamma de fuentes de calibración de ^{137}Cs

Otro de los experimentos realizados durante el transcurso de este trabajo, fue una irradiación con una fuente de calibración gamma de ^{137}Cs . Este experimento tuvo como objetivo estudiar la relación existente entre el número de eventos registrado en los sensores y la dosis gamma recibida. Para realizar esta experiencia se empleó una fuente con mayor actividad que las utilizadas en los experimentos descriptos en la Sección 5.1. Es por eso que se realizó una irradiación en el *hall* del Reactor de Investigación RA6 del Centro Atómico Bariloche con una fuente de calibración de ^{137}Cs de 100 mCi de actividad. En este caso, se colocó la fuente a una distancia de $\simeq 30\text{cm}$ de los sensores, y se midió la dosis gamma utilizando un dosímetro calibrado que se colocó a la par de la caja que contenía las cámaras. Se decidió que una distancia de $\simeq 30\text{cm}$ entre la fuente y los sensores era la óptima. Se tomó esta decisión debido a que si la distancia es muy pequeña aumenta el error que se comete en el cálculo de la dosis. Por otra parte, si la distancia entre los sensores y la fuente aumenta se detectan pocos eventos por lo que deben hacerse mediciones muy prolongadas. En la Figura 5.10 se muestra una imagen del esquema experimental utilizado para realizar esta medición.

En esa posición la tasa de dosis medida con un detector calibrado fue de aproximadamente 1,7 mGy/h. Esta tasa de dosis coincide con las calculada utilizando la hoja de datos de la fuente, teniendo en cuenta el decaimiento de la misma. A esa distancia usando un umbral U_{ev} de 64 el número de eventos detectados por segundo fue de 9,9. Esto significa que cada evento detectado (originado por fotones gamma de 0.66 MeV producidos por el ^{137}Cs) representa una dosis de aproximadamente 50 nGy. Es necesaria

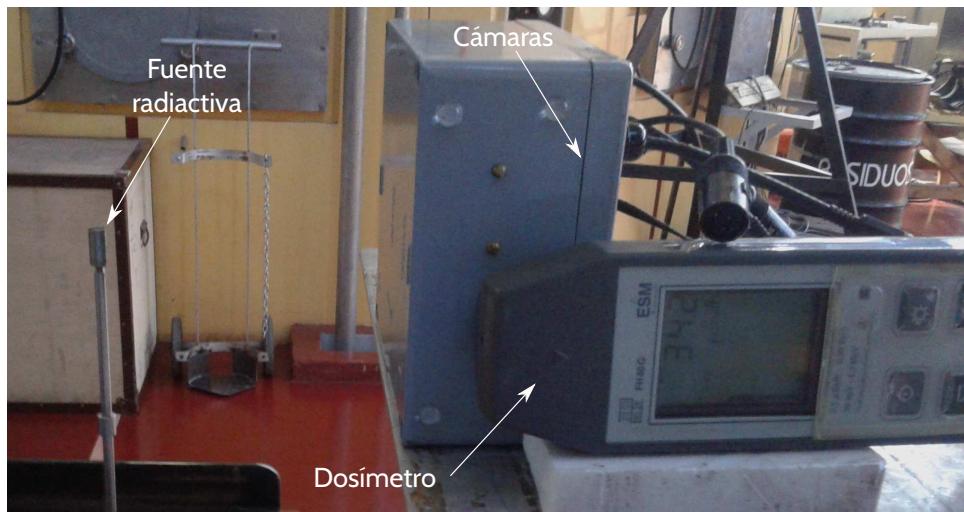


Figura 5.10: Esquema experimental de la medición realizada para la calibración de los sensores con una fuente de ^{137}Cs .

rio aclarar que la dosis por evento dependerá del tipo de radiación y de la energía de la misma.

5.2.3. Respuesta de los sensores a fotones gamma del Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6

En otro experimento realizado durante el transcurso de este trabajo, los sensores fueron irradiados utilizando el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor Nuclear de Investigación RA6 del Centro Atómico Bariloche. Estas irradiaciones se efectuaron con el fin de estudiar la capacidad de los sensores para contar partículas a diferentes tasas de dosis. Además, se buscaba demostrar que esta técnica de detección puede ser utilizada en aplicaciones en presencia del considerable fondo gamma de dicha instalación nuclear.

El Reactor RA6 cuenta con distintos conductos de extracción de radiación que comunican al núcleo con los diferentes instrumentos situados fuera de la piletta del reactor. Uno de estos conductos (el Conducto de Irradiación Pasante N°1) es utilizado por el Instrumento de Neutrografía. Dentro del conducto existe un haz formado por neutrones térmicos, neutrones epítérmicos, y rayos gamma de una amplia gama de energías. El conducto de irradiación cuenta con un recinto cerrado en donde se introducen las muestras que se desea irradiar (Figura 5.11 A) [69].

Durante el transcurso de las irradiaciones la caja que contiene las cámaras fue colocada dentro del recinto (Figura 5.11 B). Para posicionar a los sensores en el centro del haz se los colocó sobre una mesa que posee un gato que permite variar la altura de la muestra (figura 5.11 C). Los cables que conectan los sensores con las capturadoras de video y los cables de alimentación de los sensores se ingresaron al recinto utilizando un

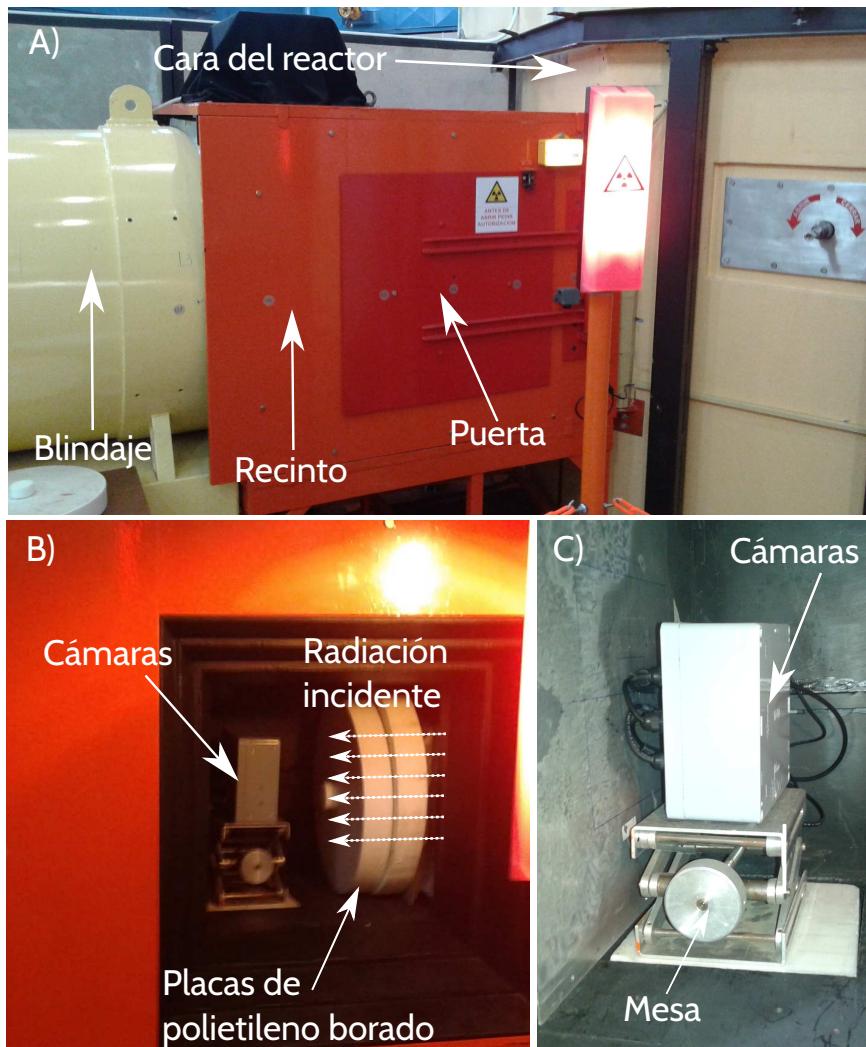


Figura 5.11: A) Conducto de Irradiación Pasante N°1. B) Cámaras colocadas dentro del recinto y placa de polietileno borado cubriendo el haz. C) Cámaras colocadas sobre una mesa de altura variable.

conducto previamente diseñado para tal fin. Se colocó una capa de polietileno borado en el haz para atenuar el flujo de neutrones térmicos y epítérmicos (Figura 5.11 B).

La medición realizada tuvo como objetivo contar el número de eventos detectados por los sensores a diferentes potencias del reactor. En primer lugar se capturó un video con el reactor apagado para realizar una medición del fondo y del FPN. No se observaron eventos en la pantalla de las computadoras mientras se estaba capturando el video. Luego, se registró un video durante el procedimiento de puesta en marcha del reactor. La potencia del núcleo fue incrementada en forma escalonada desde cero, estabilizándose durante períodos prolongados de tiempo en 1,5 kW, 10 kW, 30 kW, y 100 kW. Mientras se capturaba el video se pudieron observar eventos de diversa forma y tamaño en la pantalla de la computadora. A simple vista se pudo comprobar que la cantidad de eventos registrados por el sensor aumentaba cuando se incrementaba la potencia.

En la Figura 5.12 se presenta un gráfico con el número de eventos por segundo (cps) medidos durante la irradiación. El inserto del gráfico muestra el valor la tasa de contaje registrada (expresada en cuentas por segundo (cps)) en función de la potencia del núcleo del reactor. Se puede ver que el número de eventos registrados por el sensor es proporcional a la potencia del reactor, y que la relación entre dicha potencia y el valor de la tasa de eventos registrados es lineal. La tasa de dosis gamma cuando el reactor funciona a 100 kW es de ≈ 160 mGy por hora, estimada a partir de una caracterización previa de la instalación [69]. A 100 kW el sistema detecta ≈ 100 cuentas por segundo, lo que significa que cada evento registrado representa ≈ 460 nGy. La sensibilidad calculada es diferente en comparación con la registrada en los experimentos con las fuentes de calibración de ^{137}Cs , esto se debe a que el espectro de energía de los fotones gamma es diferente. Dichas fuentes de calibración son monoenergéticas, mientras que en el haz utilizado existen fotones gamma de un amplio rango de energías.

5.3. Detección de eventos alfa en campos mixtos

Uno de los objetivos de este trabajo, es evaluar la capacidad de los sensores de imagen CMOS empleados para realizar una clasificación de la radiación incidente. Por este motivo, se desarrolló un algoritmo que utiliza las características geométricas de los eventos, el valor máximo de los mismos, y la carga producida en el sensor para realizar una detección de partículas alfa. En la Sección 4.3, se presentó una descripción del *software* desarrollado en el marco de este trabajo, y se detallaron los parámetros calculados luego de la detección de un evento. Luego de calcular dichos parámetros, el programa ingresa en una función en la que se aplica el algoritmo para la detección de partículas alfa, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 5.13.

En la Sección 5.1.1 se mostró que, por lo general, los eventos originados por partícu-

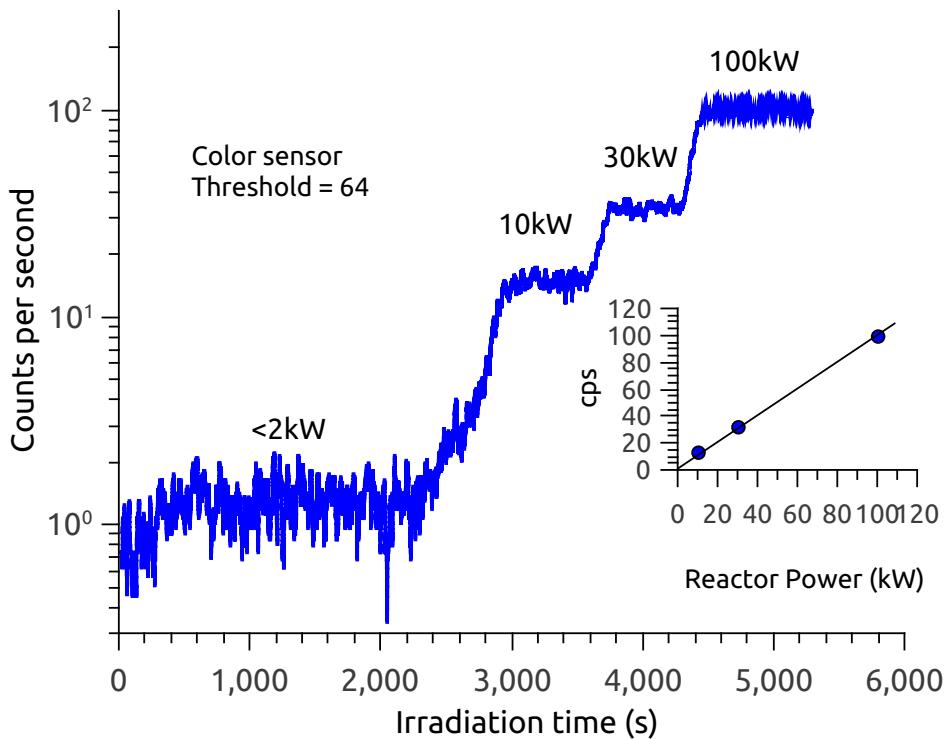


Figura 5.12: Número de eventos por segundo (cps) medidos durante la irradiación en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6. El inserto del gráfico muestra el valor de cps en función de la potencia del núcleo del reactor [3].

las alfa, tienen un valor máximo mayor al que producen eventos originados por fotones γ , X y partículas β . Por esta razón, la primera condición que debe cumplir un evento para ser validado, es que su valor máximo supere un umbral U_{max} , en este algoritmo se utiliza un valor de $U_{max}=128$. En la Figura 5.9, se puede observar que para un umbral de 128, la cantidad de eventos alfa detectados es prácticamente igual que la que se obtiene usando un umbral de 32. Por otra parte, con un umbral de 128 la cantidad de eventos producidos por fotones gamma y partículas beta disminuye un orden de magnitud con respecto a las detectadas con un umbral de 32.

En la Sección 5.1.2 se pudo comprobar que las partículas alfa generan una mayor cantidad de carga libre que otros tipos de radiación ionizante. Por lo tanto, el paso siguiente en el algoritmo es comprobar si el valor de la carga generada en el sensor es mayor a un umbral. Para lo cual, se verifica que el valor de V_{suma} que es proporcional a la carga generada por la partícula (Sección 5.1.2), sea mayor a un umbral $U_c=3000$ u.a. para el sensor color, y $U_c=1500$ u.a. para el sensor blanco y negro. En los gráficos 5.6 y 5.7 se muestra que el único tipo de radiación que origina valores de V_{suma} mayores a 1500 u.a. (sensor blanco y negro) y 3000 u.a. (sensor color) son las partículas alfa.

Para finalizar con el análisis se evalúa la forma y el radio del evento. Según lo observado en los resultados de las irradiaciones y en los trabajos previos, la forma de los eventos originados por partículas alfa se asemeja a la de una circunferencia [42][58].

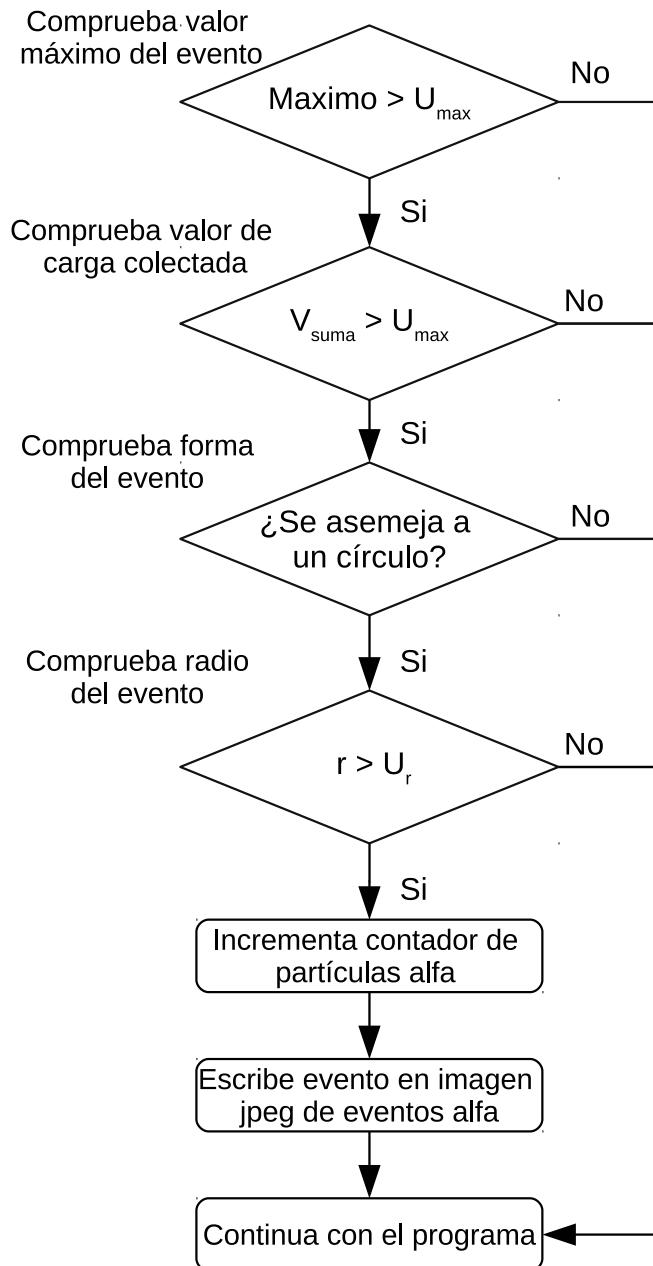


Figura 5.13: Diagrama de flujo del algoritmo implementado para aplicar el criterio de detección de partículas alfa.

Los momentos inercia de segundo orden de un círculo respecto de cualquier eje que pase por su centro de gravedad valen:

$$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{4} \quad (5.3)$$

$$I_{xy} = 0 \quad (5.4)$$

Por lo tanto, si los momentos de segundo orden I_x e I_y son similares y además I_{xy} es pequeño se puede decir que la forma del evento es circular [70]. En el caso de este algoritmo, luego de que se calculan los valores de I_x e I_y se realiza una comparación para comprobar cuál posee mayor valor. Posteriormente, se calcula el cociente entre el mayor y el menor al que se llamará cociente de momentos (C_m). El valor de C_m debe ser cercano a la unidad para que la forma del evento se asemeje a la de un círculo. Debido a que C_m siempre será mayor a la unidad, sólo basta con exigir que sea menor a un umbral $U_m=1.5$. Para finalizar, si I_{xy} es menor a un umbral $U_{xy}=0.5$ se considera que $I_{xy} \approx 0$ y que la forma del evento se asemeja a la de un círculo.

Como se observó en las pruebas con radiación, en general, las partículas alfa generan eventos de mayores dimensiones que afectan a una cantidad mayor de píxeles. En la Sección 5.1.3, se mostró que el radio de la mayoría de los eventos originados por partículas alfa supera los dos píxeles. Por lo tanto, de acuerdo al criterio seleccionado en este trabajo, la última condición que debe cumplir un evento para ser considerado un evento producido por una partícula alfa, es que su radio debe superar un umbral $U_r=2$. Si el evento cumple con todas las condiciones exigidas por el algoritmo, se incrementa un contador que registra la cantidad de eventos detectados en cada cuadro. Luego, se graba el valor del contador en un archivo de texto, y se graba el evento en una imagen *jpeg* que contiene todos los eventos alfa registrados en el video. Si el evento no cumple con todas las condiciones exigidas por el algoritmo, se lo descarta y se continua con la ejecución del programa.

Se realizó un experimento en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6, en el que se buscaba probar la eficiencia del algoritmo para la discriminación de partículas alfa. El objetivo fue someter a los sensores a un campo mixto de partículas α y rayos γ . En esta experiencia se colocó una fuente de ^{241}Am sin blindaje dentro de la caja que contenía una cámara color. Se cubrió la mitad del sensor con un papel de $100\ \mu\text{m}$ de espesor (como se muestra en la Figura 5.14 B) para evitar que las partículas alfa llegaran al mismo. La Figura 5.15 A, muestra la sombra causada por la hoja de papel, cuando el sensor es iluminado con una fuente de luz casi puntual situada a varios metros de distancia. En la parte oscura de la imagen se puede apreciar la región del sensor que estaba cubierta por el papel. Luego, se colocó la caja dentro del recinto del Instrumento, en la Figura 5.14 A se muestra un diagrama del esquema experimental. Se capturó un video durante un procedimiento de puesta en marcha y se fue aumentando

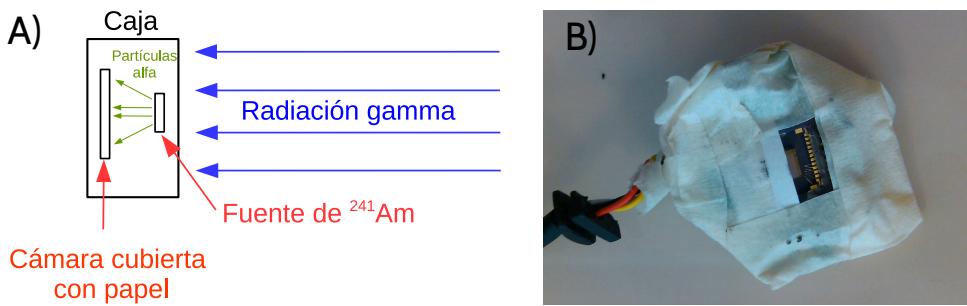


Figura 5.14: A) Diagrama del esquema experimental de el experimento para probar la eficiencia del algoritmo de discriminación de partículas alfa. B) Cámara parcialmente cubierta con papel.

la potencia de forma escalonada hasta llegar a 100 kW. Cuando se llegó a 100 kW se mantuvo el reactor a esa potencia por un lapso de 10 minutos.

La Figura 5.15 muestra las imágenes de todos los eventos registrados durante 2000 cuadros de video (66 segundos) en tres condiciones de irradiación. Las imágenes de la izquierda muestran todos los eventos registrados, mientras que las imágenes de la derecha muestran todos los eventos identificados como partículas alfa con el algoritmo. En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos en un video tomado con la fuente de ^{241}Am y con el reactor apagado (Figuras 5.15 B y C). Se puede observar que todos los eventos se registraron en la región no cubierta del sensor, tal como se esperaba. El número total de eventos detectados fue de 138, siendo 101 de ellos detectados como partículas alfa. Los 37 eventos restantes no cumplieron con el criterio de clasificación, lo que significa que, para este caso en particular, el algoritmo tiene una alta tasa de falsos negativos (40 % aproximadamente). En las Figuras 5.15 D y E, se muestran los resultados obtenidos con el reactor encendido y sin la fuente de ^{241}Am . En este caso, los eventos se distribuyeron uniformemente a lo largo del sensor como se esperaba, esto se debe a que la hoja de papel es casi transparente a los rayos gamma. El número total de eventos registrados fue de 9842, y el algoritmo identificó 42 falsos positivos, es decir, aproximadamente un 0,4 % de los gamma emitidos por el RA6 fueron erróneamente identificados como partículas alfa.

Cuando el sensor se expuso simultáneamente a los fotones gamma presentes en el haz de Neutrografía y a la fuente ^{241}Am , se obtuvieron las imágenes de las Figuras 5.15 F y G. El número total de eventos detectados fue 9782. Luego de aplicar el algoritmo, 147 de ellos fueron identificados como partículas alfa, esta cantidad es la suma de los eventos producidos por la fuente de ^{241}Am que fueron identificados como partículas alfa y los falsos positivos producidos por la radiación gamma. El número de eventos identificados, mostrados en la Figura 5.15 G, no presenta diferencias significativas con el valor de la suma de los eventos discriminados en las Figuras 5.15 C y E.

A pesar de poseer un 0,4 % de probabilidad de producir falsos positivos (fotones gamma identificados como partículas alfa), el algoritmo muestra que es posible realizar

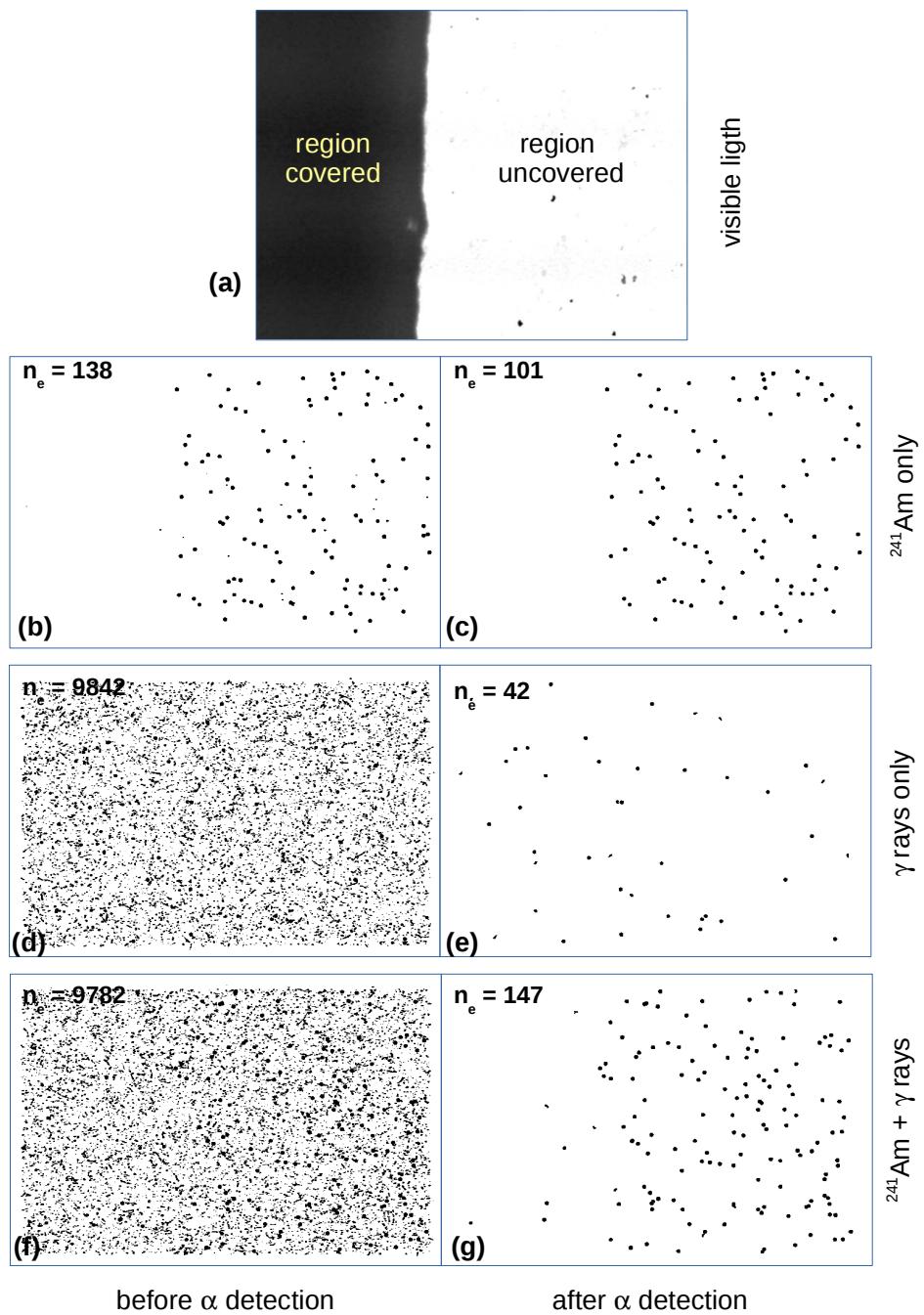


Figura 5.15: Imágenes obtenidas con el fin de analizar el método implementado para discriminar partículas alfa en campos de radiación mixtos [3].

una clasificación de partículas en campos mixtos compuestos por partículas con diferente *Linear Energy Transfer* (LET). Los parámetros establecidos en el algoritmo, fueron optimizados para tener una baja tasa de falsos positivos, a costa de tener una alta tasa de falsos negativos. Este algoritmo sería útil, por ejemplo, para detectar partículas alfa producidas por la absorción de neutrones térmicos en ^{10}B , en aplicaciones de detección de radiación tales como las que se presentan en los trabajos [13][14] y [15].

Este desarrollo también podría ser de utilidad en el marco de la actividad BNCT ya que, empleándose un sensor comercial con una capa de óxido de menor espesor, permitiría estudiar la distribución espacial de boro sobre la superficie de un corte de tejido tomado de un paciente oncológico. En las referencias [71][72][73] pueden verse trabajos previos realizados en esta temática.

5.4. Análisis del daño por radiación producido en los sensores

Luego de realizar las experiencias descriptas en las Secciones 5.1 y 5.2.3, se observó un deterioro en los sensores producido por la radiación incidente. Se pudo comprobar que la cantidad de píxeles con altos valores de FPN se incrementa con la dosis recibida, este incremento es más notorio luego de irradiaciones con partículas alfa. Para las bajas dosis gamma utilizadas durante el transcurso de este trabajo, no se observaron daños por dosis total. En la Figura 5.16, se muestran dos gráficos de malla de la totalidad de los píxeles de un sensor antes (A) y después (B) de dos irradiaciones de 30 minutos con partículas alfa provenientes de una fuente de ^{241}Am . Estos gráficos corresponden a dos cuadros de video capturados sin ningún tipo de radiación incidente. Se puede observar que luego de la irradiación el número de píxeles con valores elevados aumenta drásticamente.

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del filtro autorregresivo implementado, se realizó un análisis de la distribución de los valores de los píxeles de un sensor antes y después de una irradiación con partículas alfa de una fuente de ^{235}U , los resultados pueden observarse en la Figura 5.17. La curva negra corresponde a la distribución de un sensor antes de ser irradiado⁴, se puede observar que el valor medio de la distribución es de aproximadamente 18 cuentas de ADC, y que existen píxeles con valores elevados (FPN). La curva roja muestra la distribución de los píxeles luego de la irradiación, se puede observar que tanto el valor medio como la cantidad de píxeles con valores elevados se incrementan de forma significativa. Luego, se aplicó el filtro autorregresivo al sensor dañado, los resultados se muestran en la curva azul. Se puede observar que el valor medio de la distribución es menor que la del sensor antes de la

⁴El sensor no fue sometido a ningún tipo de radiación antes de realizar el experimento.

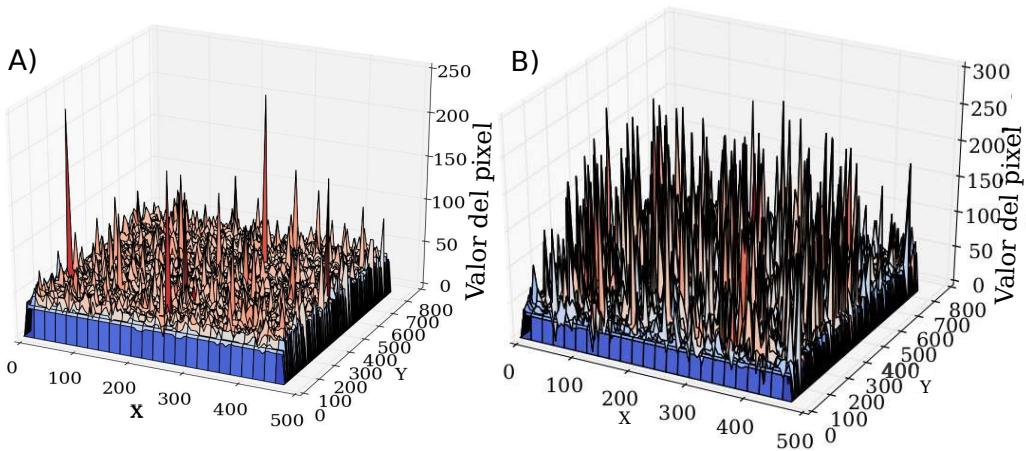


Figura 5.16: Gráficos de malla de la totalidad de los píxeles de un sensor antes (A) y después (B) de dos irradiaciones de 30 minutos con partículas alfa provenientes de una fuente de ^{241}Am .

irradiación, y que la cantidad de píxeles con valores elevados disminuye drásticamente.

De esta forma, se pudo verificar que el filtro continúa funcionando correctamente incluso cuando existe una gran cantidad de píxeles del sensor con altos valores de FPN. La tasa de falsos positivos detectados continuará siendo despreciable, debido a que la cantidad de píxeles con valores por encima del umbral U_{ev} producidos por FPN es baja luego de aplicar el filtro.

5.5. Sumario del capítulo

En este capítulo se presentaron las mediciones realizadas con diversas fuentes de calibración, y se mostró la respuesta del sensor a los diferentes tipos de partículas. Se realizó un estudio de las formas características de los diferentes tipos de eventos detectados. Por otra parte, se estudió la carga depositada por las diferentes partículas y los radios de los eventos generados por las mismas. Se pudo comprobar, que las partículas alfa emitidas por las fuentes de ^{241}Am y ^{235}U producen eventos de mayor tamaño, y generan una mayor cantidad de carga en los sensores que los eventos originados por radiación gamma.

En la segunda parte del capítulo se describió la irradiación efectuada con la fuente de calibración de ^{137}Cs , y las mediciones realizadas en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6. Se relacionó la cantidad de eventos detectados por los sensores con la dosis gamma recibida. En la Sección 5.3, se evaluó la capacidad del sistema de detección para identificar partículas alfa en campos de radiación mixtos. Se llegó a la conclusión de que este sistema de detección es capaz de realizar una clasificación de partículas con diferente *Linear Energy Transfer* (LET) en campos de radiación mixtos. Para finalizar el capítulo, se mostró que la radiación produce daños en este tipo de sensores, y que la cantidad de píxeles con altos valores de FPN se incrementa

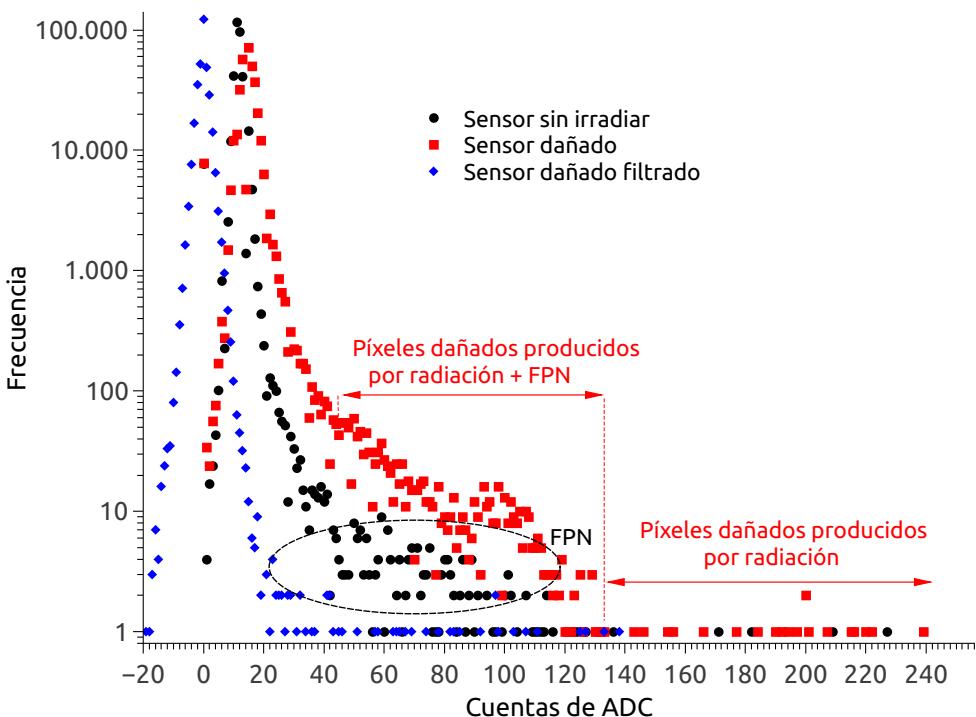


Figura 5.17: **Curva negra:** Distribución de los valores de los píxeles de un sensor sin irradiar. **Curva roja:** Distribución de los valores de los píxeles del sensor dañado como consecuencia de una irradiación con partículas alfa de una fuente de ^{235}U . **Curva azul:** Distribución de los valores de los píxeles luego de aplicar el filtro autorregresivo al sensor dañado.

con la dosis. Por otra parte, se demostró que mediante el uso del filtro autorregresivo, se pueden mitigar la mayoría de los falsos positivos que podrían llegar a producirse por los píxeles dañados. En el siguiente capítulo se presentarán los primeros pasos del desarrollo de un detector basado en una FPGA y un sensor comercial CMOS, que está especialmente diseñado para la detección de radiación ionizante.

Capítulo 6

Implementación de un detector basado en un sensor CMOS y una FPGA

Como se mencionó en las Sección 4.1, con el fin de adquirir experiencia en la interacción de los sensores de imagen con la radiación y poder caracterizar su comportamiento se decidió utilizar, en un primera etapa, cámaras de video comerciales basadas en sensores APS CMOS para realizar las pruebas con radiación. Los resultados presentados en el capítulo anterior mostraron muchas de las capacidades de los sensores, y permitieron desarrollar una técnica de medición. Pero en este tipo de cámaras no es posible controlar diversos parámetros del sensor como el tiempo de integración, o la ganancia de tensión de los amplificadores de los píxeles. Ello implicó limitaciones tales como la saturación de los valores de los píxeles en eventos producidos por partículas alfa, lo que redujo la capacidad para identificar este tipo de eventos en campos mixtos.

Para tener un mayor control del sistema de detección se decidió realizar la implementación de un detector de radiación ionizante basado en un sensor de imagen comercial CMOS y una FPGA Spartan6. La ventaja de utilizar una FPGA, es que mediante máquinas de estado es posible controlar de manera predecible los tiempos de integración, y la ganancia de los amplificadores de los píxeles. El dispositivo desarrollado está compuesto por una interfaz del tipo I2C con la que se realiza la configuración del sensor, un bloque para adquirir los datos de la imagen y una interfaz serie con la que se envían los datos leídos a una computadora para su posterior procesamiento. En este capítulo se describirá la arquitectura del sistema y se mostrarán los resultados de las primeras pruebas con radiación.

6.1. Sensor CMOS utilizado para el desarrollo

Luego de realizar un relevamiento de los sensores de imagen CMOS disponibles en el mercado se optó por la utilización del modelo MT9M001C12STM de la marca APTINA cuya imagen se muestra en la Figura 6.1 [74]. Se decidió emplear este modelo debido a que posee las siguientes ventajas:

- Posee un área activa de 6.66 mm x 5.32 mm que es casi el doble del área de los sensores de las cámaras utilizadas para las primeras mediciones (3.58 mm x 2.69 mm) [53][48].
- Posee una interfaz I2C con la cual se pueden configurar parámetros como tiempo de integración, ganancia de tensión de los amplificadores de los píxeles, balance de blancos, etc. [75]
- El chip no realiza ningún tipo de procesamiento de la imagen adquirida. Por lo que se pueden leer los valores de los píxeles luego de que son digitalizados.
- Se trata de un sensor monocromático, por lo que no cuenta con microlentes ni filtros de Bayer. Esto representa una ventaja si se desea detectar partículas alfa cuyos rangos de penetración en los materiales que conforman los sensores son cortos.
- Su encapsulado es del tipo *Ceramic Leadless Chip Carrier* (CLCC), esto permite que pueda ser soldado en circuitos impresos de forma manual, facilitando el armado de prototipos. Otros tipos de sensores poseen encapsulados del tipo *Ball Grid Array* (BGA), por lo que se requieren costosos bancos de soldadura para montarlos en circuitos impresos.

En la Figura 6.2 se muestra el diagrama en bloques del sensor. El mismo cuenta con cuatro bloques principales. En primer lugar, se encuentra el bloque que contiene la matriz de 1280 x 1024 píxeles con la que se adquiere la imagen. En segundo lugar, el bloque de procesamiento analógico (*Analog Processing*) es el encargado de la lectura de la matriz de píxeles. Los valores de tensión obtenidos luego de la lectura de los píxeles se digitalizan con un conversor analógico a digital (ADC), y se envían al exterior del chip mediante un *Bus* de 10 bits. En tercer lugar, existe otro conjunto de circuitos dentro del sensor (bloque *Timing and Control*) que se encarga de generar las señales de sincronismo que se utilizan para la lectura de los datos del *Bus*. Finalmente, el bloque *Control Register* contiene un conjunto de registros con los que se pueden configurar diferentes parámetros del sensor, estos registros pueden ser leídos y escritos utilizando una interfaz serie (*Two-wire serial Input/Output*) del tipo I2C [75].

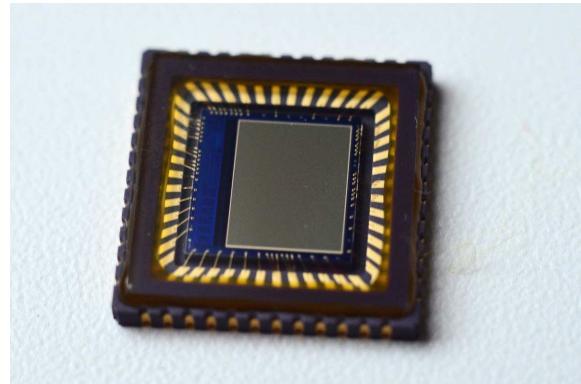


Figura 6.1: Sensor modelo MT9M001C12STM de la marca APTINA elegido para el desarrollo del detector.

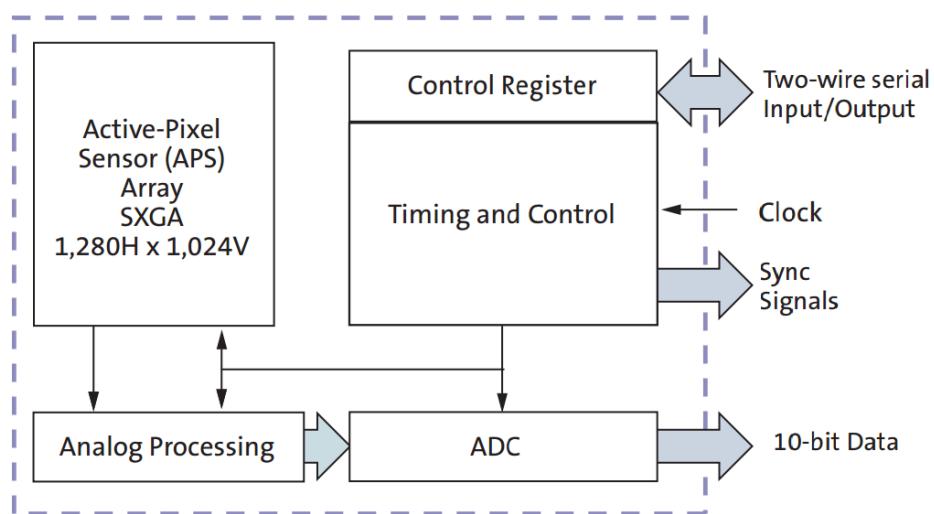


Figura 6.2: Diagrama en bloques del sensor MT9M001C12STM [74].

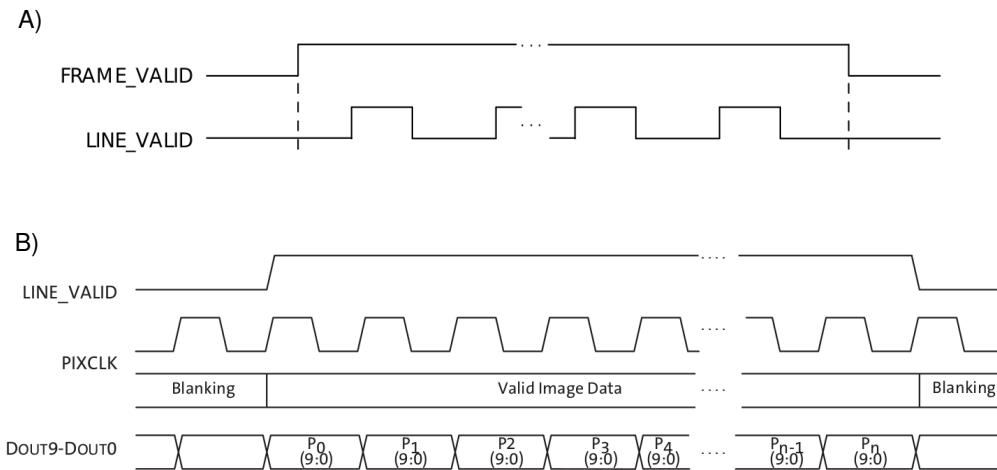


Figura 6.3: Señales de sincronismo generadas por el sensor, que intervienen durante la transmisión de las imágenes. **A)** Diagrama temporal de la transmisión de los valores de un cuadro. **B)** Diagrama temporal de la transmisión de los valores de una linea dentro de un cuadro [74].

La Figura 6.3, muestra un diagrama temporal de las señales de sincronismo generadas por el sensor, que intervienen durante la transmisión de las imágenes. Para leer los valores de imagen que son transmitidas por el bus (*Dout9-Dout0*) se utilizan tres señales de sincronismo: *FRAME_VALID*, *LINE_VALID*, y *PIXCLK*. Inicialmente las tres señales de sincronismo se encuentran con un valor bajo (≈ 0 V). En el momento en el que se comienza a transmitir un cuadro de video, la señal *FRAME_VALID* se coloca en alto (≈ 3.3 V) y se mantiene en ese valor durante toda la transmisión del cuadro de la imagen (Figura 6.3 A). Durante la transmisión de cada una de las líneas de un cuadro la señal *LINE_VALID* permanece en alto (Figura 6.3 B). La señal *PIXCLK* es una salida de reloj cuya frecuencia es igual a la que posee la entrada *CLKIN*, que es la señal de reloj que ingresa al sensor¹. Los valores presentes en el *Bus* (que representan el valor de un píxel) sólo son validos cuando las señales *FRAME_VALID* y *LINE_VALID* se encuentran en alto. Para sincronizar el circuito encargado de la lectura con la salida del sensor, se debe utilizar el flanco negativo de la señal *PIXCLK*.

Los registros del bloque *Control Register* pueden ser leídos y escritos a través de una interfaz serie I2C que utiliza dos señales *SCLK* y *SDATA* [74][75]. El sensor funciona como “esclavo” en la interfaz, mientras que el circuito que se encarga de la configuración debe ser el que controle las líneas *SCLK* y *SDATA*, por lo tanto, debe ser configurado como “maestro”. Los datos se transfieren desde y hacia el sensor a través de la línea *SDATA*, mientras que la línea *SCLK* se utiliza para la sincronización de los dispositivos presentes en la interfaz. El sensor puede ser operado con la configuración que posee por defecto, o programado por el usuario. Utilizando la interfaz serie se pueden configurar parámetros como el tamaño de la imagen, la exposición, ganancia de tensión de los amplificadores de los píxeles, etc.

¹El chip puede funcionar con frecuencias de reloj de 10MHz a 48MHz.

6.2. Placa de desarrollo utilizada para la lectura del sensor y la comunicación con la PC

Para realizar la lectura del sensor y la comunicación para enviar los datos de la imagen adquirida se utilizó una placa de desarrollo Nexys3 de la marca Digilent, que está basada en una FPGA Spartan6 de la marca Xilinx [76]. Se decidió utilizar una FPGA debido a que el sensor trabaja con altas velocidades de reloj (10 a 48 MHz), y resulta muy difícil implementar la lectura de los datos recibidos con un microcontrolador. Por otra parte, en trabajos futuros se buscará realizar todo el procesamiento de los datos dentro de la placa del detector. Por lo tanto, se deberán realizar muchas operaciones en paralelo a altas velocidades de reloj, por lo que una FPGA resulta el tipo de dispositivo más adecuado. En la Figura 6.4 se muestra una imagen de la placa de desarrollo Nexys3 utilizada en este trabajo. Algunas de las ventajas por las cuales se decidió utilizar esta placa son:

- La placa posee una memoria RAM de 16 MB en la que se pueden almacenar los valores de todos los píxeles de una imagen.
- Cuenta con un puerto “UART-USB” con el que se pueden enviar y recibir datos en serie desde la PC [77].
- Mediante la utilización de sus cuatro puertos de expansión “Pmod” de 12 pines se puede conectar una placa desarrollada a la FPGA de forma sencilla [78].
- Cuenta con 8 *leds*, 8 *switches*, 5 pulsadores y cuatro *displays* de 8 segmentos. Estos componentes son de gran utilidad cuando se desea realizar pruebas durante el desarrollo del sistema implementado.

6.3. El sistema desarrollado

El primer paso en el desarrollo del detector, fue el diseño de un circuito impreso en el que va montado el sensor, y que se conecta a la placa de desarrollo mediante tres de los puertos de expansión “Pmod”. En la Figura 6.5 se muestra una imagen del circuito impreso que contiene al sensor conectado a la placa de desarrollo. El sensor es alimentado con las salidas de 3.3 V disponibles en los puertos “Pmod”, y se utilizan 34 pines para la interconexión de ambos circuitos.

El objetivo en esta primera etapa del desarrollo es caracterizar el comportamiento de este sensor, y conocer las características de los eventos registrados con diferentes tipos de fuentes radiactivas. Con el fin de obtener los primeros resultados de forma más rápida, y facilitar la implementación del sistema, se decidió realizar el procesamiento

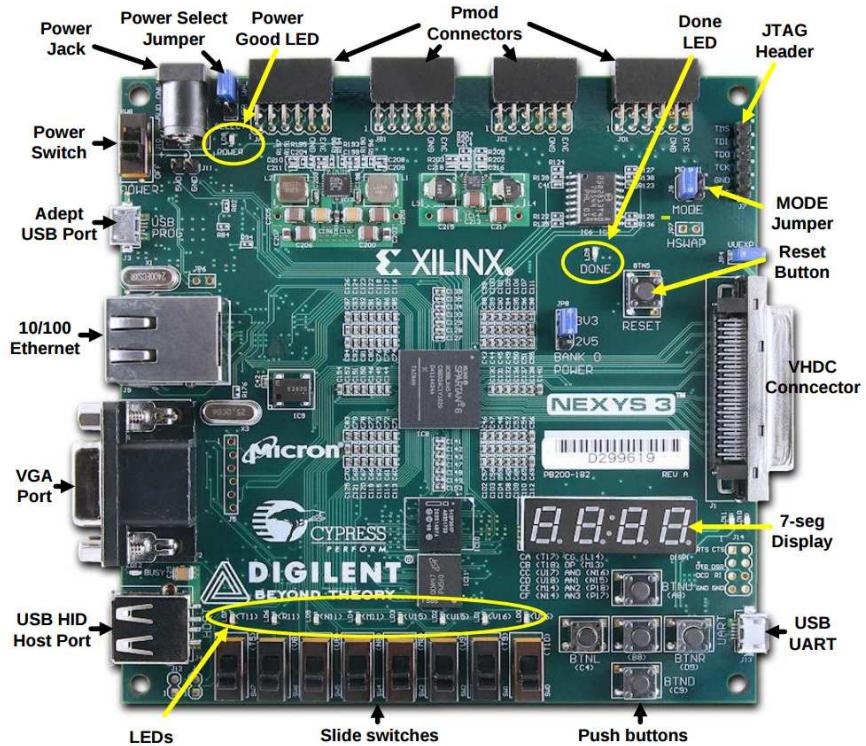


Figura 6.4: Placa de desarrollo Nexys3 [76].

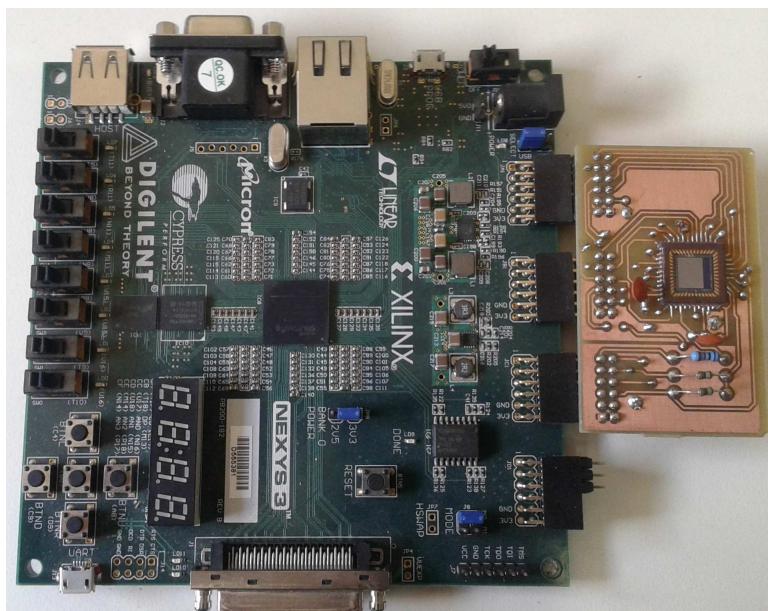


Figura 6.5: Circuito impreso que contiene al sensor conectado a la placa de desarrollo.

de los datos en una computadora y no en la FPGA. De esta forma, es posible poder reutilizar el *software* desarrollado. Si se realizara una captura de video de 30 cuadros por segundo (como en las cámaras utilizadas anteriormente) se debería contar con una interfaz capaz de transmitir 39 MB/s a la computadora. Una de las posibles soluciones sería la utilización de una interfaz USB 2.0, que posee una tasa de transferencia de 480 MB/s [79]. La implementación de este tipo de interfaces es compleja, y no se justifica debido a que sólo una pequeña parte de los píxeles de cada imagen (los que superan el umbral U_{ev}) poseen información de los eventos registrados. Esta primer versión del detector funciona como una cámara fotográfica, adquiriendo una imagen cuando se presiona uno de los pulsadores de la placa de desarrollo. Por lo tanto, no existen restricciones con respecto a la velocidad de transferencia de datos entre la placa de desarrollo y la computadora, y se puede utilizar la *UART-USB* disponible en la placa Nexys3. En esta primer etapa del desarrollo es necesario leer la totalidad de la imagen capturada por el sensor (en pruebas con luz visible), para verificar que el mismo esté siendo correctamente leído. Por otra parte, también se debe leer la totalidad de la imagen en las primeras irradiaciones, para realizar un estudio de los eventos recibidos utilizando el *software* desarrollado. En futuros desarrollos todo el procesamiento se realizará en la FPGA, y solo se enviarán a la computadora los datos de los eventos recibidos.

En la Figura 6.6 se muestra un diagrama de los bloques que componen el detector. El sistema implementado dentro de la FPGA cuenta con cuatro módulos sintetizados en lenguaje VHDL: el módulo de control, el controlador I2C, el controlador de la memoria RAM y el controlador de la UART [80]. El módulo de control es el que se encarga de la lectura del sensor y de enviar órdenes para comandar a los tres controladores, en la Figura 6.7 se muestra una máquina de estados simplificada de dicho módulo. Cuando el sistema es inicializado el módulo de control activa el controlador I2C y se envían los bytes de configuración al sensor. Luego de que la configuración es realizada ($fin='1'$), se activa un *led* que indica que el sistema se encuentra listo para recibir imágenes. Cuando el usuario desea realizar la captura de una imagen se presiona un pulsador (P1), y se comienza a leer el sensor. Debido a que la lectura de los píxeles se realiza a una frecuencia de 10 Mhz, (que es mucho mayor a la frecuencia en la que se transmiten los datos por la UART) se deben almacenar los valores de los píxeles en la memoria RAM de la placa de desarrollo antes de transmitirlos a la computadora. Cuando toda la imagen se encuentra almacenada en la memoria RAM, se enciende otro *led* en la placa de desarrollo, que indica que los datos están listos para ser transmitidos a la computadora. Cuando el usuario presiona nuevamente el pulsador P1 se comienza la transmisión de los datos. Se desarrolló un *software* en lenguaje *Python* que se encarga de recibir los datos (transmitidos en serie) y construir una matriz con los valores de los píxeles. Esta matriz es transformada en una imagen en formato *jpeg* utilizando

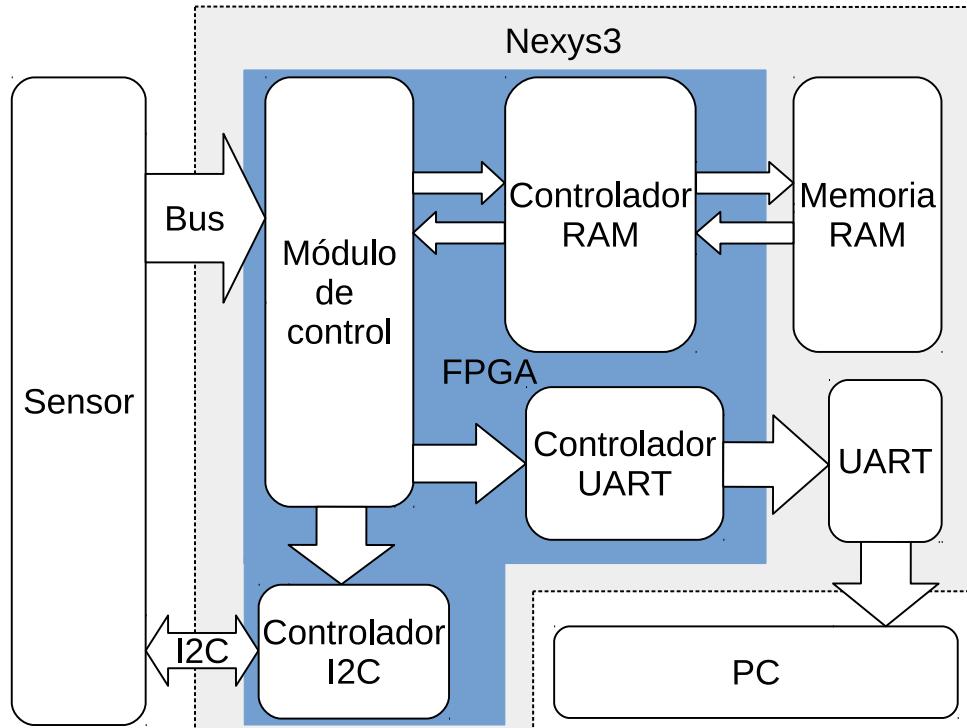


Figura 6.6: Diagrama en bloques del sistema.

comandos de la la librería *OpenCV* de *Python* [56]. Los datos quedan almacenados en la memoria RAM y pueden ser enviados a la computadora presionando el pulsador P1 nuevamente. Si se presiona un segundo pulsador (P2), el sistema vuelve a estar listo para capturar una nueva imagen. En la Figura 6.8 se muestra una tabla con la cantidad de recursos de la FPGA utilizados.

Para probar el funcionamiento del sensor se realizaron pruebas con luz visible, se colocó una lente haciendo foco sobre el sensor y se capturaron imágenes, en la Figura 6.9 se muestra una de las primeras capturas realizadas. La imagen obtenida no es de buena calidad debido a que no se pudo realizar un correcto enfoque. Aun así se observa el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de la imagen.

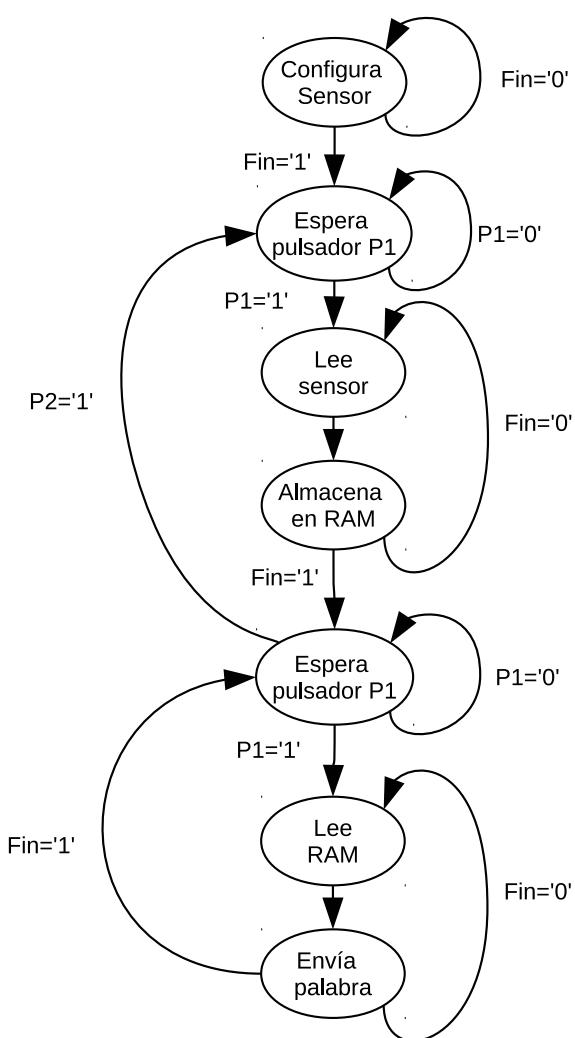


Figura 6.7: Máquina de estados simplificada del modulo de control.

Device Utilization Summary				[i]	
Slice Logic Utilization		Used	Available	Utilization	Note(s)
Number of Slice Registers	164	18,224		1%	
Number used as Flip Flops	152				
Number used as Latches	12				
Number used as Latch-thrus	0				
Number used as AND/OR logics	0				
Number of Slice LUTs	254	9,112		2%	
Number used as logic	246	9,112		2%	
Number using O6 output only	146				
Number using O5 output only	39				
Number using O5 and O6	61				
Number used as ROM	0				
Number used as Memory	4	2,176		1%	
Number of occupied Slices	89	2,278		3%	
Number of MUXCYs used	92	4,556		2%	
Number of LUT Flip Flop pairs used	262				
Number with an unused Flip Flop	117	262		44%	
Number with an unused LUT	8	262		3%	
Number of fully used LUT-FF pairs	137	262		52%	
Number of unique control sets	16				
Number of slice register sites lost to control set restrictions	60	18,224		1%	
Number of bonded IOBs	76	232		32%	
Number of LOCed IOBs	75	76		98%	
Number of RAMB16BWERS	0	32		0%	
Number of RAMB8BWERS	0	64		0%	
Number of BUFI02/BUFI02_2CLKs	0	32		0%	
Number of BUFI02FB/BUFI02FB_2CLKs	0	32		0%	
Number of BUFG/BUFGMUXs	1	16		6%	
Number used as BUFGs	1				
Number used as BUFGMUX	0				
Number of DCM/DCM_CLKGENs	0	4		0%	
Number of ILOGIC2/ISERDES2s	0	248		0%	
Number of IODELAY2/IODRP2/IODRP2_MCBs	0	248		0%	
Number of OLOGIC2/OSERDES2s	0	248		0%	
Number of BSCANs	0	4		0%	
Number of BUFHs	0	128		0%	
Number of BUFPLLs	0	8		0%	
Number of BUFPPLL_MCBs	0	4		0%	
Number of DSP48A1s	0	32		0%	
Number of ICAPs	0	1		0%	
Number of MCBS	0	2		0%	
Number of PCILOGICSEs	0	2		0%	
Number of PLL_ADVs	0	2		0%	
Number of PMVs	0	1		0%	
Number of STARTUPs	0	1		0%	
Number of SUSPEND_SYNCs	0	1		0%	
Average Fanout of Non-Clock Nets	3.88				

Figura 6.8: Tabla con la cantidad de recursos de la FPGA utilizados.

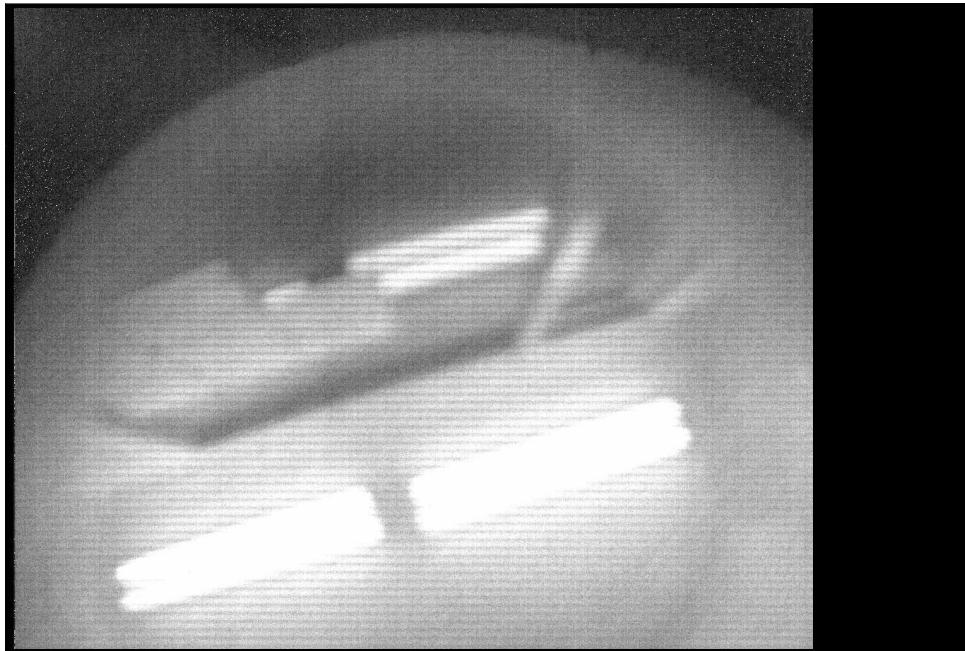


Figura 6.9: Imagen capturada para verificar el funcionamiento del sensor.

6.4. Primeras pruebas con radiación

Luego de realizar las pruebas con luz visible y comprobar que el sensor estaba siendo leído correctamente se comenzaron a realizar las pruebas con radiación ionizante. El objetivo de estas experiencias, fue estudiar la respuesta del sensor con diferentes valores de ganancia de tensión en los amplificadores de los píxeles (G_p). Al igual que en las experiencias descriptas en el capítulo anterior, el sensor fue colocado en una caja estanca a la luz, y se le retiro el vidrio que recubría la superficie del mismo. Con el fin de verificar que la configuración del chip se estaba efectuando de manera correcta, se comenzó tomando imágenes sin ninguna fuente radioactiva y con diferentes valores de G_p (0.125, 1, 4, y 8), luego se calculó el valor medio de todos los píxeles de cada imagen. En la Figura 6.10 se muestra un gráfico de los valores obtenidos, se puede observar que la relación entre ambas variables es lineal. De esta forma se comprobó que el valor medio aumentaba con la ganancia como se esperaba y que sensor respondía correctamente a las configuraciones efectuadas. En el gráfico también se puede observar que para ganancia nula el valor medio de los píxeles no es cero. Este efecto se debe a un *offset* en la salida de los amplificadores, este problema fue solucionado restando el valor medio de las imágenes obtenidas durante el procesamiento de las mismas.

Luego de verificar que el valor de G_p podía ser configurado correctamente, se realizaron irradiaciones con una fuente de calibración gamma de ^{137}Cs , y con una fuente de calibración de ^{235}U . En primer lugar, se colocó la fuente de ^{137}Cs a unos milímetros de la superficie del sensor y se capturaron varias imágenes con cada uno de los valores de ganancia (0.125, 1, 4, y 8), luego se hizo lo mismo con la fuente de ^{235}U . Para realizar

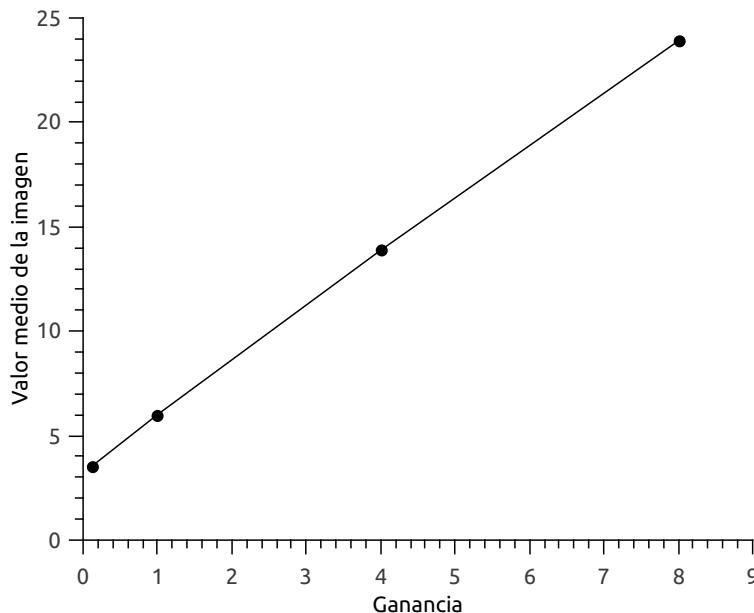


Figura 6.10: Valor medio de las imágenes tomadas en función de la ganancia.

el análisis de las imágenes se adaptó el *software* desarrollado para el procesamiento de video, de esta forma se puede obtener la misma cantidad de información que en los experimentos anteriores. En este caso, como todas las imágenes fueron tomadas en un periodo de tiempo corto, se utilizaron otros métodos durante el procesamiento para eliminar el FPN y la corriente de oscuridad. Se restó el valor medio del cuadro para eliminar la corriente de oscuridad. Además, analizando las fotografías tomadas sin las fuentes radioactivas se pudo notar que solo existían píxeles individuales con FPN, por lo tanto, durante el procesamiento solo se tuvieron en cuenta los eventos que poseían más de tres píxeles por encima del umbral U_{ev} .

Con el fin de tener en cuenta la variación de G_p en la identificación de los eventos, se utilizaron diferentes valores de U_{ev} para procesar las imágenes. Los valores del umbral se fueron variando en la misma proporción que la ganancia, para las imágenes tomadas con $G_p = 8$ se utilizó un $U_{ev} = 64$, para las tomadas con $G_p = 4$ se utilizó un $U_{ev} = 32$ y cuando se configuró el sensor con un valor de $G_p = 1$ las imágenes fueron procesadas con $U_{ev} = 8$. Siguiendo con la misma lógica se debería haber tomado un $U_{ev} = 1$ para $G_p = 0.125$, en la práctica no fue posible debido a que con ese valor de umbral se detectaron muchos falsos positivos originados por el ruido de oscuridad. Para realizar el procesamiento con ese valor de ganancia, el mínimo valor del umbral U_{ev} posible fue de 6.

En la Figura 6.11 se muestran gráficos de malla pertenecientes a eventos generados por la fuente de ^{137}Cs para diferentes valores de ganancia, cabe destacar que para el caso de $G_p = 0.125$ y un umbral $U_{ev} = 6$ no se detectaron eventos. En los gráficos se puede apreciar que las formas de los eventos son similares a las observadas en la Sección

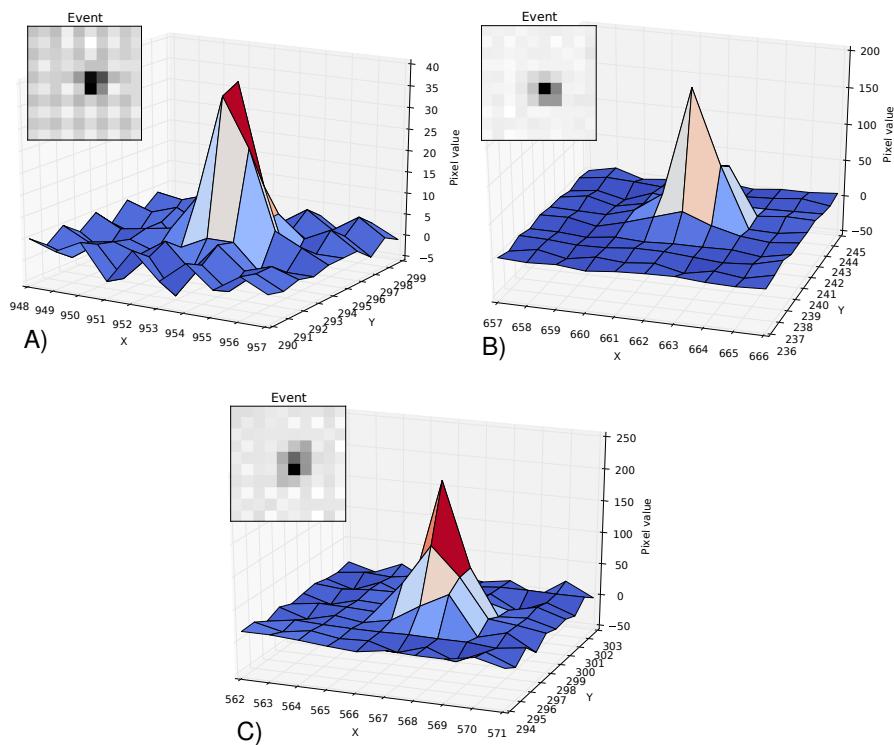


Figura 6.11: Gráficos de malla de eventos originados por una fuente de ^{137}Cs . **A)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 1$. **B)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 4$. **C)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 8$.

5.1.1. Por otra parte, se puede comprobar que (como se esperaba) el valor máximo de los eventos aumenta cuando la ganancia del sensor es mayor. Para el caso de este tipo de eventos no se observa saturación en los píxeles para $G_p = 8$.

En la Figura 6.12, se muestran los gráficos de malla de los eventos producidos por la fuente de ^{235}U para diferentes valores de ganancia. En esta oportunidad, se registró una importante cantidad de eventos para todos los valores de G_p . Al igual que en el caso anterior, el valor máximo de los eventos aumenta cuando la ganancia del sensor es mayor. También se observa que los píxeles se saturan para $G_p = 4$ y $G_p = 8$, y que tanto la cantidad de píxeles con valores elevados, como el radio de los eventos registrados aumenta con la ganancia. En la Figura 6.13, se muestran los histogramas normalizados de los valores máximos de los eventos producidos por la fuente de ^{235}U , para los cuatro valores de ganancia. Mediante estos gráficos, se puede comprobar la dependencia que existe entre los valores máximos de los eventos y la ganancia G_p . Por otro lado, se puede observar que los picos para las tres mayores ganancias tienen valores muy similares, debido a que los píxeles se saturan cuando interactúan con este tipo de partículas.

En la Figura 6.14 se muestran los histogramas de la cantidad de eventos detectados en función de los valores de carga colectada (V_{suma}), con cada uno de los valores de G_p , para ambas fuentes radiactivas. Se puede observar que al igual que en los resultados mostrados en capítulo anterior (Gráficos 5.6 y 5.7) la carga depositada por las partículas

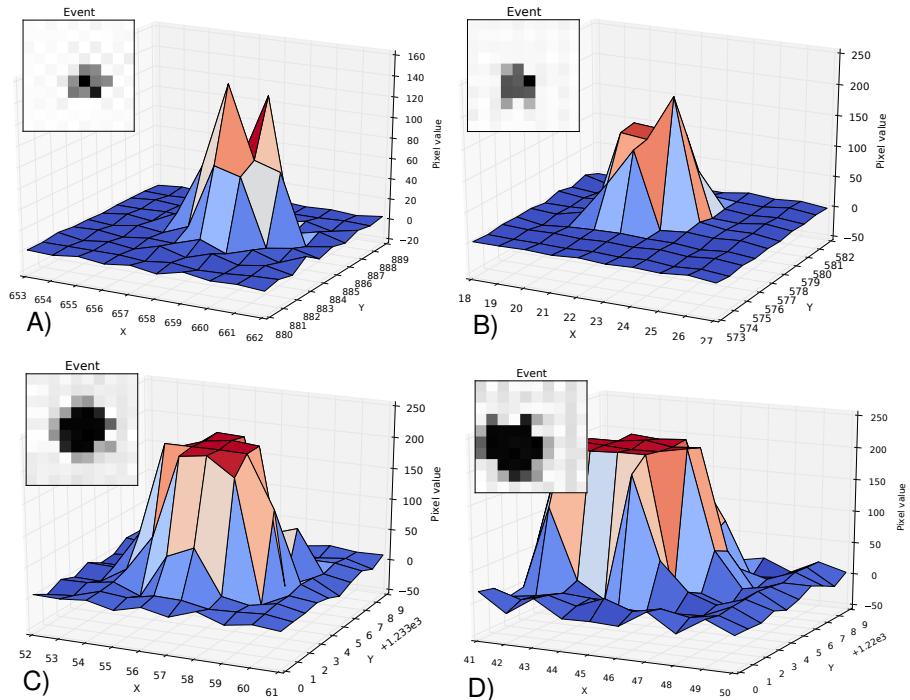


Figura 6.12: Gráficos de malla de eventos originados por una fuente de ^{235}U . **A)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 0.125$. **B)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 1$. **C)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 4$. **D)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 8$.

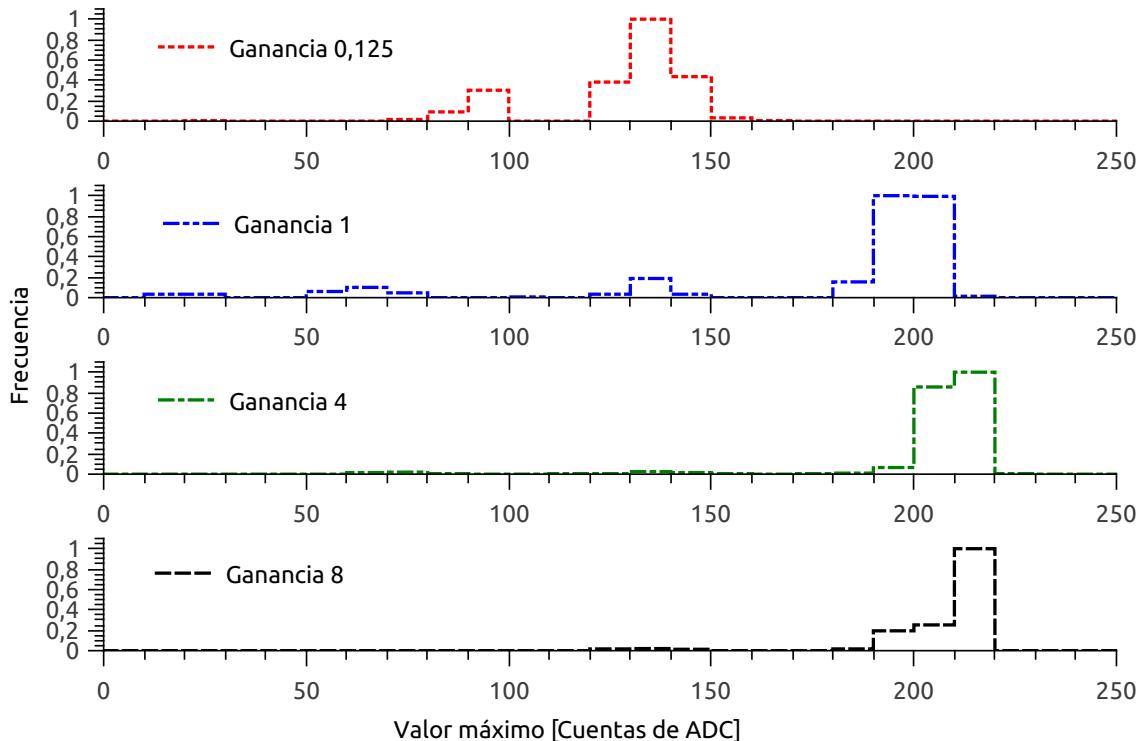


Figura 6.13: Histogramas normalizados de los valores máximos de los eventos producidos por una fuente de ^{235}U para diferentes valores de ganancia.

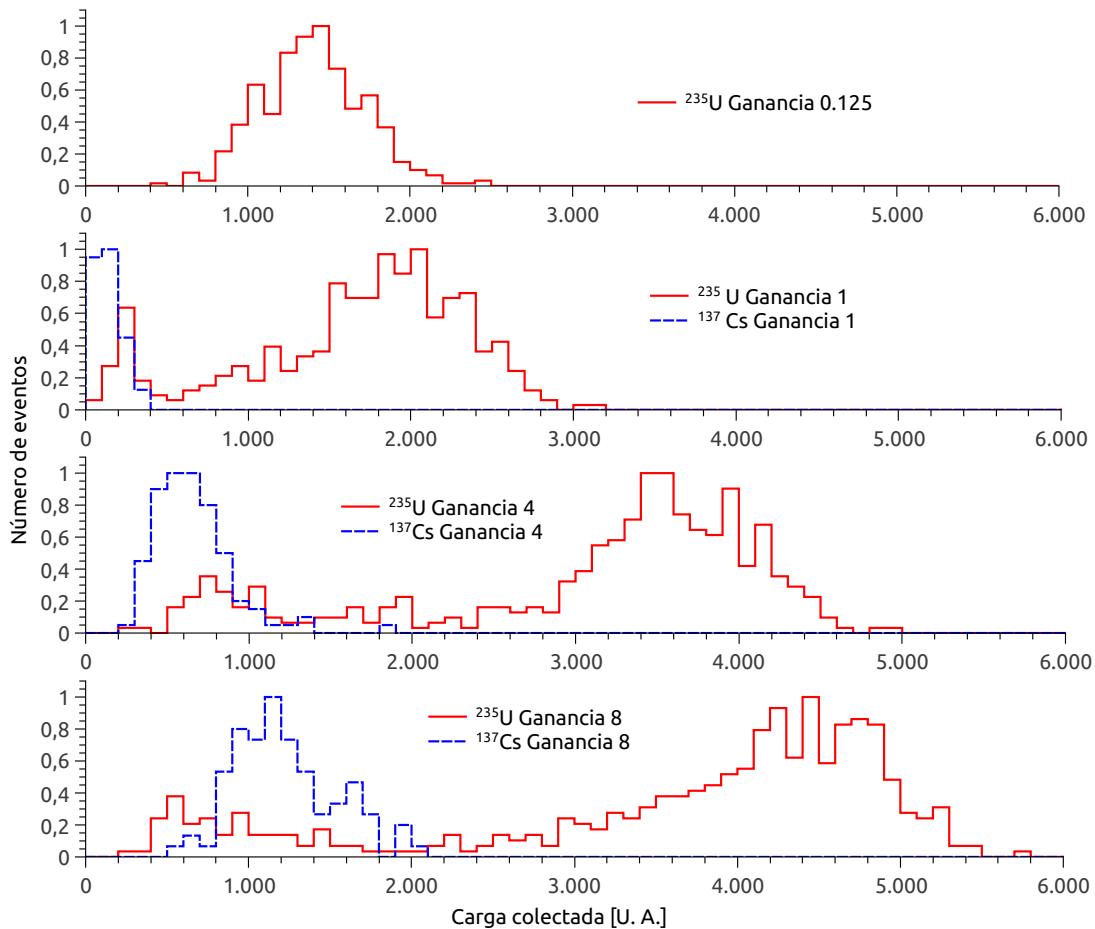


Figura 6.14: Histogramas normalizados de carga colectada por los eventos producidos por una fuente de ^{235}U , y una fuente de ^{137}Cs para diferentes valores de ganancia.

alfa emitidas por el uranio, es mayor a la depositada por las partículas beta y los rayos gamma del ^{137}Cs . Debido a que con $G_p = 0.125$ no se detectaron eventos con la fuente de ^{137}Cs , y que para los demás valores de G_p los eventos producidos por la fuente de ^{235}U saturan los píxeles, no se puede conocer la relación existente entre la carga generada por los eventos producidos por ambas fuentes radioactivas. En base a estos resultados se puede observar que podrían existir dos posibles estrategias para la discriminación de eventos producidos por partículas alfa en campos mixtos. En primer lugar se podría utilizar la ganancia mas baja disponible (en este caso $G_p = 0.125$) debido a que no se detectaron eventos con la fuente de ^{137}Cs . Como segunda estrategia, se podría utilizar la ganancia mas elevada y de esta forma lograr una mayor separación entre los picos de carga generados por partículas alfa y los picos generados por partículas beta y rayos gamma.

6.5. Sumario del capítulo

En este capítulo se describió el desarrollo de la primera versión de un detector basado en un sensor de imagen comercial CMOS y una FPGA. En primer lugar, se presentó el modelo del sensor elegido, se enumeraron sus ventajas, y se describió su estructura. Luego se describió la placa de desarrollo elegida y se justificó la elección de la misma. En la Sección 6.3 se realizó una descripción de la estructura y el funcionamiento del sistema implementado. Por último, se mostraron los resultados de las primeras pruebas con radiación. Se realizaron irradiaciones con fuentes de ^{137}Cs y ^{235}U , con diferentes valores de ganancia de tensión en los amplificadores de los píxeles. También se pudo observar que con valores de ganancia G_p mayores a 0.125 se produce saturación de los píxeles del sensor en los eventos originados por partículas alfa. Este efecto sumado al hecho de que no se observaron eventos con la fuente de ^{137}Cs y una ganancia $G_p = 0.125$, impide conocer la relación existente entre la carga generada por los eventos originados por ambas fuentes. Mediante el control de la ganancia se logra una mejor detección de las partículas alfa, lo que potencialmente reducirá la tasa de falsos positivos en detección de partículas alfa en campos mixtos. En el siguiente capítulo se presentarán las conclusiones generales de este trabajo, y se describirán los pasos a seguir en el desarrollo de esta técnica de detección de radiación.

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo se presentó el desarrollo de una técnica de detección de radiación ionizante basada en sensores de imagen comerciales con tecnología CMOS. En el Capítulo 1 se presentaron algunas de las principales aplicaciones de la detección de radiación ionizante. Se pudo observar que el rango de usos es muy amplio, y abarca muchas disciplinas como la física, la medicina, la ingeniería, la arqueología, entre otras. En algunos casos como en la dosimetría y la física médica la medición y cuantificación de las dosis de radiación adquiere suma importancia debido a que de ella depende la salud de trabajadores y pacientes.

En el Capítulo 2 se presentaron las técnicas de detección de radiación más utilizadas en la actualidad, y se analizaron sus principales ventajas y desventajas. Tanto en los dosímetros TLD como en los de emulsión fotográfica no se puede conocer la dosis recibida de manera inmediata. Los detectores gaseosos, los centelladores, y los detectores semiconductores estudiados requieren de altas tensiones para ser polarizados, son costosos y frágiles. En el caso de los centelladores se necesitan foto-multiplicadores para realizar las mediciones. Los detectores CCD y los detectores de Ge(Li) deben estar refrigerados con nitrógeno. Con la información brindada en ese capítulo se pudo concluir que sería deseable disponer de una técnica que permita detectar radiación ionizante con un dispositivo sencillo y económico. También se concluyó que sería deseable disponer de una técnica que permita obtener lecturas de forma instantánea, con buena resolución espacial y temporal.

En el Capítulo 3 se realizó una breve introducción en la que se mostraron las características principales de la tecnología CMOS y el funcionamiento de los sensores de imagen del tipo *Active Pixel Sensor*. Luego, se explicaron los efectos presentes durante la interacción entre la radiación ionizante y los píxeles APS. En la última sección del capítulo, se demostró experimentalmente que los sensores de imagen CMOS son sensibles a diversos tipos de radiación como partículas alfa y rayos gamma.

En el Capítulo 4 se describieron las cámaras utilizadas en el trabajo, y el esquema

experimental que se empleó para capturar los videos durante las irradiaciones realizadas. Luego, se explicó el funcionamiento del *software* desarrollado para el análisis de los videos. Por último, se realizó un análisis del *Fixed Pattern Noise* y ruido de oscuridad presentes en los sensores utilizados. Se explicó porque se deben eliminar y se describió el funcionamiento del filtro autorregresivo diseñado para tal fin. En el final del capítulo se estudió la distribución estadística del valor de los píxeles de los sensores. Este análisis se utilizó para demostrar que a través de un simple algoritmo computacional, se puede mitigar la corriente de oscuridad, su distribución (FPN) y el ruido de oscuridad.

En el Capítulo 5 se presentaron las mediciones realizadas con diversas fuentes de calibración, y se mostró la respuesta del sensor a los diferentes tipos de partículas. Se realizó un estudio de las formas características de los diferentes tipos de eventos detectados. Por otra parte, se estudió la carga depositada por las diferentes partículas y los radios de los eventos generados por las mismas. Se pudo comprobar, que las partículas alfa emitidas por las fuentes de ^{241}Am y ^{235}U producen eventos de mayor tamaño, y generan una mayor cantidad de carga en los sensores que los eventos originados por radiación gamma. En la segunda parte del capítulo se describió la irradiación efectuada con la fuente de calibración de ^{137}Cs , y las mediciones realizadas en el Conducto de Irradiación Pasante N°1 del Reactor RA6. Se relacionó la cantidad de eventos detectados por los sensores con la dosis gamma recibida. Se demostró que este tipo de sensores pueden ser utilizados para contar eventos a diferentes tasas de dosis en aplicaciones reales. Se demostró que la resolución en dosis de los detectores (que depende de la energía de los fotones incidentes) puede ser menor a $1\mu\text{Gy}$, con un número insignificante de falsos positivos. Para finalizar el capítulo, se evaluó la capacidad del sistema de detección para identificar partículas alfa en campos de radiación mixtos. Se llegó a la conclusión de que este sistema de detección es capaz de realizar una clasificación de partículas con diferente *Linear Energy Transfer* (LET) en campos de radiación mixtos. Este desarrollo podría ser de utilidad en el marco de la actividad BNCT ya que, empleándose un sensor comercial con una capa de material aislante de menor espesor, se podría estudiar la distribución espacial de boro sobre la superficie de un corte de tejido tomado de un paciente oncológico. En las referencias [71][72][73] pueden verse trabajos previos realizados en esta temática.

En el Capítulo 6 se describió el desarrollo de la primera versión de un detector basado en un sensor de imagen comercial CMOS y una FPGA. En primer lugar, se presentó el modelo del sensor elegido, se enumeraron sus ventajas, y se describió su estructura. Luego se describió la placa de desarrollo elegida y se justificó la elección de la misma. Se realizó una descripción de la estructura y el funcionamiento del sistema implementado, y se mostraron los resultados de las primeras pruebas con fuentes de calibración gamma de ^{60}Co y ^{137}Cs .

Los resultados presentados en este trabajo en el que se utilizaron tres sensores

diferentes de diferentes fabricantes, con nueve diferentes fuentes de irradiación, complementan los resultados previos obtenidos en las referencias [81], [17], y [18]. Estos trabajos muestran que con un adecuado procesamiento de las imágenes obtenidas es posible utilizar sensores de imagen comerciales CMOS como detectores de partículas. Se demostró que en condiciones de baja dosis, este tipo de sensores tiene potenciales aplicaciones dentro de la física médica, estos resultados complementan a los obtenidos en la referencia [81]. Por otra parte, este tipo de sensores podrían ser utilizados en disciplinas como la radioprotección y la dosimetría ambiental, así como también en aplicaciones científicas.

Como continuación del presente trabajo se están desarrollando diferentes capas de conversión para cubrir la superficie de los sensores, que permitan la detección de neutrones térmicos. Se busca detectar con las técnicas mencionadas previamente las partículas secundarias producto de la reacción entre los neutrones incidentes y alguna capa de material sensible a neutrones. Esta idea, frecuentemente usada en muchos detectores de neutrones, fue aplicada exitosamente utilizando sensores de imagen tipo CCD [15]. Por otra parte, se continuará con el desarrollo del detector basado en FPGA con el objetivo de generar un dosímetro personal basado en esta técnica de detección. Se mejorará la implementación del sistema, para que todo el procesamiento de los datos sea efectuado dentro de la FPGA, además se buscará migrar el sistema a una placa de desarrollo más pequeña y que posea la posibilidad de ser alimentada con baterías.

Publicaciones asociadas a esta tesis

Artículos en revistas científicas

- Pérez, M., Lipovetzky, J., Haro, M. S., Sidelnik, I., Blostein, J. J., Bessia, F. A., & Berisso, M. G. (2016). Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 827, 171-180.

Proceedings de conferencias

- Pérez, M., Haro, M. S., Sidelnik, I., Tozzi, L., Brito, D. R., Mora, C., ... & Lipovetzky, J. (2015, July). Commercial CMOS pixel array for beta and gamma radiation particle counting. In Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA), 2015 Argentine School of (pp. 11-16). IEEE.

Patentes de invención

- Mariano Gómez Berisso; Juan Jerónimo Blostein; José Lipovetzky; Hernán Pastoriza; Martín Pérez; Iván Pedro Sidelnik; Miguel Sofo Haro, "DETECTOR DE PARTÍCULAS IONIZANTES BASADO EN SENsoRES DE IMAGEN CMOS COMERCIALES Y TÉCNICA DE ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN DE EVENTOS." solicitud presentada el 21/07/2015, expediente 20150102319, solicitada por CONICET/CNEA solicitud de validez en otros países en trámite.
- Aureliano Tartaglione, José Lipovetzky, Berisso Mariano, Pérez Martín, Fabricio Alcalde Bessia, Iván Pedro Sidelnik, Miguel Sofo Haro, Juan Jerónimo Blostein, Hernán Pastoriza, "Detector de neutrones térmicos y subtérmicos de alta resolución espacial en dos dimensiones basado en sensores electrónicos CCD y CMOS y un conversor que contiene gadolinio" solicitud de patente de invención presentada el 14/06/2016 ante INPI, expediente 2016011772 CONICET/CNEA.

Premios recibidos

- Primer premio a la mejor tesis de maestría en el concurso “TTTC’s E.J. McCLUSKEY BEST 2016 LATIN AMERICAN PhD THESIS CONTEST & MASTER THESIS CONTEST” llevado a cabo en el marco del “IEEE Latin American Test Symposium 2016” (LATS 2016) - Foz de Iguaçu, Brasil 2016.

Bibliografía

- [1] Knoll, G. F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, 2010. [1](#), [14](#), [15](#), [18](#), [19](#), [22](#), [24](#), [61](#), [65](#)
- [2] Grupen, C., Buvat, I. Handbook of particle detection and imaging. Springer Science & Business Media, 2011. [1](#), [10](#), [11](#)
- [3] Pérez, M., Lipovetzky, J., Haro, M. S., Sidelnik, I., Blostein, J. J., Bessia, F. A., *et al.* Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **827**, 171 – 180, 2016. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216302844>. [1](#), [56](#), [57](#), [61](#), [62](#), [67](#), [68](#), [70](#), [72](#), [77](#), [81](#)
- [4] Perez, M., Haro, M. S., Sidelnik, I., Tozzi, L., Brito, D. R., Mora, C., *et al.* Commercial CMOS pixel array for beta and gamma radiation particle counting. En: Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA), 2015 Argentine School of, págs. 11–16. 2015. [1](#), [51](#), [52](#), [53](#), [55](#)
- [5] Gómez Berisso, M., Blostein, J., Lipovetzky, J., Pastoriza, H., Pérez, M., Sidelnik, I., *et al.* Ionizing particle detector based on commercial on the shelf CMOS image sensors, technical analysis and classification of events, July 2015. [1](#)
- [6] Degerli, Y., Guilloux, F., Orsini, F. A novel CMOS sensor with in-pixel auto-zeroed discrimination for charged particle tracking. *Journal of Instrumentation*, **9** (05), C05018, 2014. [1](#)
- [7] Morel, F., Hu-Guo, C., Bertolone, G., Claus, G., Colledani, C., Dorokhov, A., *et al.* Mistral & astral: two cmos pixel sensor architectures suited to the inner tracking system of the alice experiment. *Journal of Instrumentation*, **9** (01), C01026, 2014. [1](#)
- [8] Mager, M., Collaboration, A., *et al.* Alpide, the monolithic active pixel sensor for the alice its upgrade. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec-*

tion A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015.

1

- [9] Llopert, X., Campbell, M., Dinapoli, R., San Segundo, D., Pernigotti, E. Medipix2: a 64-k pixel readout chip with 55- μm square elements working in single photon counting mode. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, **49** (5), 2279–2283, 2002.
- 2
- [10] of Glasgow, U. Medipix - high energy physics collaborators deliver technological breakthrough behind world's most advanced x-ray detector. http://www.gla.ac.uk/schools/physics/research/researchimpact/headline_300603_en.html, 2013. [Online; accessed 5-jul-2016]. 2
- [11] Perić, I., Kreidl, C., Fischer, P. Particle pixel detectors in high-voltage CMOS technology—new achievements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **650** (1), 158–162, 2011. 2
- [12] Turchetta, R., Berst, J., Casadei, B., Claus, G., Colledani, C., Dulinski, W., et al. A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSI CMOS technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **458** (3), 677–689, 2001. 3
- [13] Zhang, Y., Hu-Guo, C., Husson, D., Higueret, S., Lê, T.-D., Hu, Y. Design of a monolithic CMOS sensor for high efficiency neutron counting. *Microelectronics Journal*, **43** (11), 730–736, 2012. 3, 82
- [14] Vanstalle, M., Husson, D., Higueret, S., Trocmé, M., Lê, T., Nourreddine, A. Demonstrating the γ -transparency of a CMOS pixel detector for a future neutron dosimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **662** (1), 45–48, 2012. 3, 62, 82
- [15] Jerónimo Blostein, J., Estrada, J., Tartaglione, A., Sofo Haro, M., Fernández Moroni, G., Cancelo, G. Development of a novel neutron detection technique by using a boron layer coating a Charge Coupled Device. *Journal of Instrumentation 10 P01006*, 2015. URL <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/01/P01006>. 3, 82, 103
- [16] Servoli, L., Biagetti, D., Passeri, D., Gattuso, E. S. Characterization of standard CMOS pixel imagers as ionizing radiation detectors. *Journal of Instrumentation*, **5** (07), P07003, 2010. 3, 70

- [17] Conti, E., Placidi, P., Biasini, M., Bissi, L., Calandra, A., Checcucci, B., *et al.* Use of a CMOS image sensor for an active personal dosimeter in interventional radiology. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, **62** (5), 1065–1072, 2013. [3](#), [70](#), [103](#)
- [18] Meroli, S., Biagetti, D., Passeri, D., Placidi, P., Servoli, L., Tucceri, P. A grazing angle technique to measure the charge collection efficiency for CMOS active pixel sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **650** (1), 230–234, 2011. [3](#), [103](#)
- [19] Whiteson, D., Mulhearn, M., Shimmin, C., Brodie, K., Burns, D. Observing ultra-high energy cosmic rays with smartphones. *arXiv preprint arXiv:1410.2895*, 2014. [3](#)
- [20] Karapetian, A., Some, R., Beahan, J. Radiation fault modeling and fault rate estimation for a cots based space-borne supercomputer. In: Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE, tomo 5, págs. 5–2121–5–2131 vol.5. 2002. [3](#)
- [21] Lauenstein, J. M. Standards for radiation effects testing: Ensuring scientific rigor in the face of budget realities and modern device challenges—accessed october, 2015, 2015. URL <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150011462>. [3](#)
- [22] Velazco, R., Clemente, J., Hubert, G., Mansour, W., Palomar, C., Franco, F., *et al.* Evidence of the robustness of a COTS soft-error free sram to neutron radiation. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, **61** (6), 3103–3108, Dec 2014. [3](#)
- [23] Attix, F. H. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. John Wiley & Sons, 2008. [5](#), [14](#), [15](#)
- [24] Commission, G. A. E. Dosemeters in use. http://en.eeae.gr/?fvar=html/dosi/_dosim_used, 2009. [Online; accessed 1-may-2016]. [6](#)
- [25] Fundación Wikimedia, I. Radioterapia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Radioterapia>, 2016. [Online; accessed 1-may-2016]. [7](#)
- [26] Grupen, C., Shwartz, B. Particle detectors, tomo 26. Cambridge university press, 2008. [7](#), [10](#), [65](#)
- [27] Facts, N., Center, J. S. Understanding space radiation. Inf. téc., FS-2002-10-080-JSC, Oct, 2002. [8](#)

- [28] Bezerra, F., Lorfrevre, E., Ecoffet, R., Falguere, D., Bourdoux, P. Carmen/mex test board for the study of radiation effects on electronic components aboard jason-2 and sac-d satellites. En: 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2007. [8](#)
- [29] Pasachoff, N. Marie Curie: and the Science of Radioactivity. Oxford University Press, 1996. [8](#)
- [30] Gilmore, R. S. Single particle detection and measurement. CRC Press, 1992. [8](#)
- [31] Soria, A. F. Física nuclear y de partículas. Universitat de València, 2011. [9](#)
- [32] Berger, R., Horney, A. G., Libby, W. Radiocarbon dating of bone and shell from their organic components. *Science*, **144** (3621), 995–1001, 1964. [10](#)
- [33] FIGINI, A. “datación radiocarbónica. teoría, método, práctica y limitaciones: Para arqueólogos y geocientíficos”. [10](#)
- [34] TANARRO SANZ, . A. Curso de introducción a la ingeniería nuclear detectores de radiaciones nucleares, 1959. [14](#), [15](#), [18](#), [22](#)
- [35] Agency, I. I. A. E. RADIATION PROTECTION OF PATIENTS FOR RADIOGRAPHERS Accra. <https://gnssn.iaea.org/>, 2011. [Online; accessed 22-jun-2016]. [14](#)
- [36] Sahare, P., Ranjan, R., Salah, N., Lochab, S. K3na (so4) 2: Eu nanoparticles for high dose of ionizing radiation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40** (3), 759, 2007. [16](#)
- [37] Balseiro, I. Apuntes de catedra de la materia protección radiológica. [21](#)
- [38] Rabaey, J. M., Chandrakasan, A. P., Nikolic, B. Digital integrated circuits, tomo 2. Prentice hall Englewood Cliffs, 2002. [23](#), [30](#), [31](#), [32](#), [33](#), [35](#)
- [39] Boyle, W. S., Smith, G. E. Charge coupled semiconductor devices. *Bell System Technical Journal*, **49** (4), 587–593, 1970. [25](#)
- [40] astarmathsandphysics. Charge Coupled Devices. <http://astarmathsandphysics.com/a-level-physics-notes/169-electronics/2619-charge-coupled-devices.html>. [Online; accessed 22-jun-2016]. [25](#)
- [41] Pawley, J. B. More than you ever really wanted to know about charge-coupled devices. *connections*, **2**, 3, 2006. [26](#)

- [42] Estrada, J., Molina, J., Blostein, J., Fernandez, G. Plasma effect in silicon charge coupled devices (ccds). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **665**, 90–93, 2011. [26](#), [48](#), [71](#), [77](#)
- [43] Gerardin, S., Bagatin, M., Raine, M., Gasiot, G., Roche, P., Herrmann, M., et al. Ionizing radiation effects in electronics from memories to imagers. [29](#)
- [44] Allen, P. E., Holberg, D. R. Cmos analog circuit design, 2002. [30](#)
- [45] Inductiveload. File:Cross section of a CMOS inverter.svg. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cross_section_of_a_CMOS_inverter.svg, 2009. [Online; accessed 10-jun-2016]. [32](#)
- [46] estiasis.com. Image Sensors. <http://www.estiasis.com/story/image-sensors>, 2005. [Online; accessed 1-may-2016]. [34](#)
- [47] Inc., O. A. Introduction to CMOS Image Sensors. <http://www.olympusmicro.com/primer/digitalimaging/cmosimagesensors.html>, 2012. [Online; accessed 1-may-2016]. [34](#)
- [48] OmniVision Technologies, Inc. OV5116N SINGLE IC CMOS MONOCHROME CAMERA WITH NTSC ANALOG OUTPUT, mayo 2001. Version 2.1. [37](#), [43](#), [44](#), [86](#)
- [49] Baumann, R. Soft errors in commercial integrated circuits. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, **14** (02), 299–309, 2004. [37](#), [38](#), [39](#)
- [50] Schrimpf, R. D., Fleetwood, D. M. Radiation effects and soft errors in integrated circuits and electronic devices, tomo 34. World Scientific, 2004. [37](#), [38](#)
- [51] Ferlet-Cavrois, V., Massengill, L. W., Gouker, P. Single event transients in digital cmos—a review. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, **60** (3), 1767–1790, 2013. [37](#), [38](#)
- [52] Karnik, T., Hazucha, P. Characterization of soft errors caused by single event upsets in cmos processes. *Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on*, **1** (2), 128–143, 2004. [37](#), [38](#)
- [53] Aptina Imaging Corporation. 1/4-Inch VGA Digital Image Sensor MT9V011 Data Sheet, 5 2004. PDF:9441249584/Source:7716559265 Rev. D 5/12 EN. [43](#), [44](#), [86](#)
- [54] Organization, V. VLC media player. <http://www.videolan.org/vlc/>, 2016. [Online; accessed 15-jun-2016]. [45](#)

- [55] Foundation, P. S. Python. <https://www.python.org/>, 2001-2016. [Online; accessed 15-jun-2016]. 47
- [56] Itseez. Opencv. <http://opencv.org/>, 2016. [Online; accessed 15-jun-2016]. 47, 92
- [57] developers, N. Numpy. <http://www.numpy.org/>, 2016. [Online; accessed 16-jun-2016]. 48
- [58] Aguilar-Arevalo, A., Amidei, D., Bertou, X., Bole, D., Butner, M., Cancelo, G., *et al.* Measurement of radioactive contamination in the high-resistivity silicon ccds of the damic experiment. *Journal of Instrumentation*, **10** (08), P08014, 2015. 48, 77
- [59] Lim, S., El Gamal, A. Gain fixed pattern noise correction via optical flow. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, **51** (4), 779–786, 2004. 52
- [60] Amsler, C., Doser, M., Antonelli, M., Asner, D., Babu, K., Baer, H., *et al.* Review of particle physics. *Physics Letters B*, **667** (1), 1–6, 2008. 61, 63, 65, 69
- [61] Hubbell, J. H., S. M. Seltzer, N. I. o. S., Technology. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 kev to 20 mev for elements z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>, 2004. URL <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>. 62, 65
- [62] Janesick, J. R. Scientific charge-coupled devices, tomo 117. SPIE press Bellingham, Washington, 2001. 65
- [63] Edmonds, L. Charge collection from ion tracks in simple epi diodes. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, **44** (3), 1448–1463, Jun 1997. 69
- [64] M.J. Berger, M. Z., J.S. Coursey, Chang, J. Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. 70
- [65] Henke, B. L., Gullikson, E. M., Davis, J. C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at e= 50-30,000 ev, z= 1-92. *Atomic data and nuclear data tables*, **54** (2), 181–342, 1993. 70
- [66] Shcherback, I., Yadid-Pecht, O. CMOS APS crosstalk characterization via a unique submicron scanning system. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, **50** (9), 1994–1997, 2003. 71

- [67] Shcherback, I., Danov, T., Yadid-Pecht, O. A comprehensive CMOS APS crosstalk study: Photoresponse model, technology, and design trends. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, **51** (12), 2033–2041, 2004. [71](#)
- [68] Mutoh, H. 3-D optical and electrical simulation for CMOS image sensors. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, **50** (1), 19–25, 2003. [71](#)
- [69] Guanes, F. A. M., Blaumann, H., Sanchez, F. A. Caracterización y optimización de la facilidad de radiografía con neutrones on-line del reactor ra-6., 2007. [74](#), [76](#)
- [70] Cobo, J. O. Simetría Mecánica. AuthorHouse, 2012. [79](#)
- [71] González, S., Bonomi, M., Santa Cruz, G., Blaumann, H., Larrieu, O. C., Menéndez, P., *et al.* First bnct treatment of a skin melanoma in argentina: dosimetric analysis and clinical outcome. *Applied radiation and isotopes*, **61** (5), 1101–1105, 2004. [82](#), [102](#)
- [72] Portu, A., Rossini, A. E., Thorp, S. I., Curotto, P., Pozzi, E. C. C., Granell, P., *et al.* Simultaneous observation of cells and nuclear tracks from the boron neutron capture reaction by uv-c sensitization of polycarbonate. *Microscopy and Microanalysis*, **21** (04), 796–804, 2015. [82](#), [102](#)
- [73] Portu, A., Carpano, M., Dagrosa, A., Cabrini, R., Saint Martin, G. Qualitative autoradiography with polycarbonate foils enables histological and track analyses on the same section. *Biotechnic & Histochemistry*, **88** (5), 217–221, 2013. [82](#), [102](#)
- [74] Aptina Imaging Corporation. 1/2-Inch Megapixel CMOS Digital Image Sensor MT9M001C12STM (Monochrome), 5 2004. PDF: 0185865399/Source: 7657919000 - Rev.K Pub. 5/11 EN. [86](#), [87](#), [88](#)
- [75] Semiconductors, P. The i2c-bus specification. *Philips Semiconductors*, **9397** (750), 00954, 2000. [86](#), [88](#)
- [76] Digilent, Inc. Nexys3TM Board Reference Manual, 2013. Doc: 502-182. [89](#), [90](#)
- [77] Strangio, C. E. The rs232 standard. *Online Document*, **10**, 2006. [89](#)
- [78] Digilent, Inc. Digilent PmodTM Interface Specification, 2011. Doc: 510-002. [89](#)
- [79] USB Implementers Forum, I. Universal Serial Bus. <http://www.usb.org>. [Online; accessed 16-jul-2016]. [91](#)
- [80] Christen, E., Bakalar, K. Vhdl-ams-a hardware description language for analog and mixed-signal applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, **46** (10), 1263–1272, 1999. [91](#)

- [81] Paolucci, M., Battisti, D., Biasini, M., Checcucci, B., Di Lorenzo, R., Esposito, A., *et al.* A real time active pixel dosimeter for interventional radiology. *Radiation Measurements*, **46** (11), 1271–1276, 2011. [103](#)