

ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN V<sub>CAL</sub>  
ENTRE PÍXELES Y ESTUDIO DE LOS EFECTOS  
MACROSCÓPICOS DE LA RADIACIÓN SOBRE SENSORES DEL  
DETECTOR DE PÍXELES DE CMS

Por

John Gabriel Acosta Castillo

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

en

FÍSICA

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO  
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

Agosto, 2010

Aprobada por:

---

Pablo J. Marrero, Ph.D  
Miembro, Comité Graduado

---

Fecha

---

Dorial Castellanos, Ph.D  
Miembro, Comité Graduado

---

Fecha

---

Ángel M. López, Ph.D  
Presidente, Comité Graduado

---

Fecha

---

Jaime E. Ramírez-Vick, Ph.D  
Representante de Estudios Graduados

---

Fecha

---

Héctor J. Jiménez, Ph.D  
Director del Departamento

---

Fecha

Abstract of Dissertation Presented to the Graduate School  
of the University of Puerto Rico in Partial Fulfillment of the  
Requirements for the Degree of Master in Sciences

**STUDY OF THE VCAL CALIBRATION WITHIN PIXELS AND  
STUDY OF THE MACROSCOPIC RADIATION EFFECTS ON  
SENSORS OF THE CMS PIXEL DETECTOR**

By

John Gabriel Acosta Castillo

2010

Chair: Ángel M. López  
Major Department: Physics

This work presents the study of two aspects of the performance of the CMS pixel detectors which are relevant to predicting their behavior under operating conditions.

The first study quantifies the differences of the response of individual pixels to a calibration signal. The data was taken using X ray photon sources and it was analyzed using software wrote in C++ and ROOT. The precision of position measurements by the detector depends critically on understanding the relative response of pixels.

The second study concerns the performance of the pixel silicon sensor exposed to high radiation doses of protons and pions and can be used to predict at what level of radiation exposure the detector will need to be replaced. It shows the main macroscopic changes by the sensors, specifically it work study the changes in the inverse current and changes of the depletion voltage.

Resumen de Disertación Presentado a Escuela Graduada  
de la Universidad de Puerto Rico como requisito parcial de los  
Requerimientos para el grado de Maestría en Ciencias

**ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN V<sub>CAL</sub>  
ENTRE PÍXELES Y ESTUDIO DE LOS EFECTOS  
MACROSCÓPICOS DE LA RADIACIÓN SOBRE SENSORES DEL  
DETECTOR DE PÍXELES DE CMS**

Por

John Gabriel Acosta Castillo

Agosto 2010

Consejero: Ángel M. López  
Departamento: Física

Este trabajo presenta el resultado de dos estudios orientados a comprender el comportamiento de los sensores del detector de píxeles del experimento CMS en las condiciones de operación.

El primer estudio realizado con el fin de cuantificar las diferencias en la respuesta de los píxeles ante una señal de calibración llamada *V<sub>cal</sub>*. Los datos han sido tomados utilizando fuentes de fotones de rayos X y analizados con software escrito en C++ y ROOT.

El segundo estudio muestra los principales cambios macroscópicos sufridos por los sensores diseñados para el detector de píxeles al ser sometidos a altas dosis de radiación. Los sensores han sido expuestos a radiación directa de protones y piones. El estudio se centra en la determinación del voltaje de operación requerido y el incremento en las corrientes de fugas de los sensores.

Copyright © 2010

por

John Gabriel Acosta Castillo

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que han orientado mi camino.

A mis padres que con su amor y compañía me han dado fuerza en momentos de debilidad.

A Sandra quien decidió acompañarme en este camino, ha sido soporte y motivación para avanzar.

A mis maestros que gracias a sus consejos, experiencia y apoyo me han hecho ver siempre un poco mas lejos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin la colaboración de personas que gracias a su experiencia y paciencia me orientaron en momentos importantes del desarrollo de este trabajo.

Agradezco al profesor Dr. Ángel López por darme la oportunidad de trabajar para el proyecto CMS. Con su experiencia y apoyo ofreció importantes aportes que permitieron llevar este trabajo a buen termino.

A Sandra Oliveros quien colaboro activamente en el proceso de adquisición y análisis de datos que sustentan este trabajo.

A la Dr. Valeria Radicci quien me asesoro constantemente y fue mi orientadora.

Al Dr. Timan Rohe y al Dr. Andrei Stadurumov, quienes aportaron con su experiencia durante el proceso de análisis de datos.

## Índice general

	<u>pagina</u>
ABSTRACT ENGLISH . . . . .	II
RESUMEN EN ESPAÑOL . . . . .	III
AGRADECIMIENTOS . . . . .	VI
Índice de tablas . . . . .	X
Índice de figuras . . . . .	XI
1. INTRODUCCIÓN . . . . .	1
2. EL DETECTOR DE PÍXELES EN EL EXPERIMENTO CMS . . . . .	3
2.1. Detector CMS . . . . .	3
2.2. El detector de trazas . . . . .	4
2.3. Detector de píxeles . . . . .	5
2.3.1. El módulo . . . . .	6
3. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR . . . . .	8
3.1. Modelo de bandas . . . . .	9
3.2. Principio de funcionamiento de detectores de silicio . . . . .	10
3.2.1. Cristales de silicio tipo P . . . . .	11
3.2.2. Silicio tipo N . . . . .	12
3.2.3. Unión P-N . . . . .	12
3.3. Características del sensor de píxeles . . . . .	14
3.3.1. Unión $N^+$ en N para el sensor de píxeles . . . . .	14
3.3.2. Concentración de oxígeno en el sustrato del sensor . . . . .	16
3.4. Ángulo de Lorentz . . . . .	16
4. EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LOS SENSORES DE PÍXELES . . . . .	19
4.1. Interacción de la radiación con el silicio . . . . .	19
4.1.1. Generación de pares electrón-hueco mediante procesos IEL . . . . .	20
4.1.2. Pérdida de energía por procesos de ionización . . . . .	21
4.1.3. Distribución de Landau . . . . .	22
4.1.4. Interacción del silicio con radiación electromagnética . . . . .	23
4.2. Pérdida de energía mediante procesos NIEL . . . . .	25
4.2.1. Mecanismo de daño en el silicio cristalino por procesos NIEL . . . . .	25
4.2.2. Cuantificación del daño en sensores usando unidades NIEL . . . . .	26

4.2.3.	Proceso de Inversión . . . . .	28
4.2.4.	Voltaje de operación en sensores irradiados . . . . .	29
4.2.5.	Efecto en la corriente de fugas . . . . .	31
5.	ELECTRÓNICA ACOPLADA . . . . .	32
5.1.	Chip de lectura del sensor psi46 . . . . .	32
5.1.1.	Electrónica acoplada a cada píxel . . . . .	33
5.1.2.	Electrónica en la periferia de la doble columna . . . . .	35
5.1.3.	Señal analógica . . . . .	35
5.2.	Parámetros de configuración DAC . . . . .	37
5.2.1.	Descripción de los principales parámetros DAC . . . . .	37
6.	CUALIFICACIÓN DE MÓDULOS DEL DETECTOR DE PÍXELES . . . . .	41
6.1.	Ajustes de optimización del módulo . . . . .	41
6.1.1.	Ajuste del DAC CalDel . . . . .	41
6.1.2.	Prueba <i>Trimbit</i> . . . . .	43
6.1.3.	Calibración de la señal de salida <i>Pulse height</i> . . . . .	43
6.1.4.	Relación entre <i>VCal</i> y <i>Pulse height</i> . . . . .	46
6.2.	Adquisición de datos con la tarjeta de pruebas PSI46 . . . . .	46
6.2.1.	Tamaño de los <i>Cluster</i> . . . . .	47
7.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN DEL PARÁMETRO VCal EN- TRE PÍXELES . . . . .	49
7.1.	Montaje Experimental . . . . .	50
7.1.1.	Tarjeta de pruebas <i>psi46</i> . . . . .	51
7.1.2.	Módulo M590 . . . . .	52
7.1.3.	Fuente radioactiva Am 241 . . . . .	52
7.2.	Software utilizado . . . . .	54
7.2.1.	Paquete <i>psi46expert</i> . . . . .	55
7.2.2.	Software adicional escrito para este trabajo . . . . .	55
7.3.	Procedimiento Experimental . . . . .	56
7.3.1.	Toma de datos . . . . .	56
7.3.2.	Determinación de equivalencia del parámetro <i>Vcal</i> . . . . .	57
7.4.	Criterios de calidad . . . . .	61
7.4.1.	Bondad de ajuste en las curvas de respuesta de los píxeles . . . . .	61
7.4.2.	Parámetros de la función de ajuste . . . . .	61
7.4.3.	Criterios de calidad en el ajuste lineal . . . . .	62
7.4.4.	Píxeles Seleccionados . . . . .	63
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN DEL PARÁMETRO VCal ENTRE PÍXELES . . . . .	64
8.1.	Resultados . . . . .	64

8.1.1.	Distribución de los valores de $V_{Threshold}$ equivalente . . .	64
8.1.2.	Distribución de los valores de $V_{cal}$ . . . . .	64
8.1.3.	Relación del ancho de las distribuciones $V_{cal}$ con el valor de $V_{Threshold}$ . . . . .	66
8.1.4.	Distribución de los valores de pendientes . . . . .	66
8.1.5.	Distribución de los valores de intercepto . . . . .	70
8.1.6.	Resultados para los $ROC$ s más iluminados. . . . .	70
8.2.	Relación de los resultados con calibraciones anteriores . . . . .	72
8.3.	Comparación con resultados anteriores . . . . .	73
9.	MONTAJE EXPERIMENTAL PARA MEDIR SENSORES IRRADIA- DOS . . . . .	75
9.0.1.	Fuente Radioactiva Sr90 . . . . .	77
9.1.	Descripción de las muestras de sensores . . . . .	77
9.2.	Procedimiento experimental . . . . .	78
9.2.1.	Toma de datos con la fuente Sr90 . . . . .	78
9.2.2.	Determinación del voltaje de operación . . . . .	80
10.	RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE INTENSIDAD DE SEÑAL EN SENSORES IRRADIADOS . . . . .	83
10.1.	Voltaje de operación del detector . . . . .	83
10.2.	Corriente de fugas en las muestras estudiadas . . . . .	86
10.3.	Efectos sobre la eficiencia de recolección de carga en los sensores .	88
10.4.	Voltaje de operación del detector y el ángulo de Lorentz . . . . .	89
10.5.	Tiempo útil del detector . . . . .	89
11.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS . . . . .	91
11.1.	Estudio de las diferencias de calibración del parámetro $V_{cal}$ entre píxeles . . . . .	91
11.2.	Comportamiento de los sensores irradiados . . . . .	92
11.3.	Recomendaciones y trabajos futuros . . . . .	92

## Índice de tablas

<u>Tabla</u>		<u>pagina</u>
4-1.	Probabilidad de absorción para fotones de rayos X en un sensor de silicio con $270\mu m$ de espesor. . . . .	25
4-2.	Características energéticas de la interacción de electrones, protones, neutrones y núcleos de silicio en un cristal de silicio. . . . .	26
8-1.	Tabulación de los RMS y los valores medios de las distribuciones obtenidas en los ROC más iluminados. . . . .	72
8-2.	Valor de los RMS para los dos tipos de calibración. . . . .	74
10-1.	Dosis de radiación recibida por las diferentes capas del detector de píxeles en un año trabajando a luminosidad máxima. . . . .	89

## Índice de figuras

Figura	pagina
2-1. Configuración del detector CMS [1]. . . . .	4
2-2. Capas del detector de trazas [1]. . . . .	5
2-3. configuración del detector de píxeles [2]. . . . .	6
2-4. Piezas principales de un módulo del detector de píxeles [3]. . . . .	7
3-1. Detalle del sensor del detector de píxeles [4]. . . . .	8
3-2. Modelo de bandas [5]. . . . .	9
3-3. Modelo bidimensional del silicio. . . . .	11
3-4. Modelo bidimensional del silicio tipo P. . . . .	11
3-5. Modelo bidimensional del silicio tipo N. . . . .	12
3-6. Modelo de la unión P-N [5]. . . . .	13
3-7. Modelo de las uniones en un píxel N en $N^+$ [6]. . . . .	15
3-8. Trayectoria probable dentro de un segmento del detector de píxeles [7].	17
4-1. Distribución de Landau para $270\mu m$ de silicio. . . . .	22
4-2. coeficiente de atenuación para silicio. . . . .	24
4-3. Simulación del efecto de un núcleo de silicio de energía cinética de 50 KeV después de ser impactado por un neutrón. . . . .	27
4-4. Sección eficaz para partículas equivalentes al daño producido por neu- trones con energía cinética de 1 MeV sobre silicio cristalino. . . . .	28
4-5. Concentración de portadores en función del flujo radioactivo. . . . .	30
5-1. Diagrama de bloques del <i>ROC</i> . . . . .	33
5-2. Esquema de la electrónica acoplada a cada píxel. . . . .	34
5-3. Señal analógica. . . . .	36
5-4. Diagrama de bloques PSI46. . . . .	38

6-1. VThreshold (voltaje umbral) Vs Caldel. . . . .	42
6-2. Ejemplo de medida para un píxel típico. . . . .	44
6-3. Ejemplo de ajuste para un píxel típico. . . . .	45
6-4. Distribución del tamaño de los <i>Cluster</i> . . . . .	48
7-1. Configuración del experimento para la toma de datos. . . . .	50
7-2. Tarjeta de pruebas <i>psi46</i> . . . . .	51
7-3. Módulo de prueba . . . . .	52
7-4. Diagrama de niveles de energía accesibles por los electrones en un átomo	53
7-5. Espectro de emisión de los blancos de la fuente de X Am241 . . . . .	54
7-6. Configuración del experimento para la toma de datos . . . . .	56
7-7. Ejemplo de ajuste para un píxel . . . . .	58
7-8. Mapa de entradas por cada blanco de la fuente radioactiva . . . . .	60
7-9. Distribuciones de los parámetros de ajuste . . . . .	62
7-10. Mapa de píxeles que superan los criterios de calidad en el <i>ROC 4</i> . . .	63
8-1. Distribuciones VThreshold equivalente . . . . .	65
8-2. Distribuciones de VCal . . . . .	67
8-3. La figura muestra como el valor del RMS de las distribuciones de <i>Vcal</i> para los píxeles se hace más grande para valores de <i>VThreshold</i> bajos.	68
8-4. Distribución de las pendientes para el <i>ROC 4</i> . . . . .	69
8-5. Distribución del intercepto para el <i>ROC 4</i> . . . . .	70
8-6. Distribución de la magnitud de la señal en electrones para una inyec- ción de carga <i>Vcal</i> 60 en el <i>ROC 4</i> . . . . .	71
8-7. Distribución de pendientes calibración <i>VCal</i> . . . . .	73
9-1. Montaje experimental sensores irradiados . . . . .	75
9-2. Espectro Beta Sr 90. . . . .	77
9-3. Distribución IEL con un voltaje inverso de 200V . . . . .	79
9-4. Gráfica <i>MPV</i> de cada distribución vs voltaje inverso. . . . .	81
9-5. Método de intersección en una gráfica <i>MPV</i> vs voltaje inverso. . . .	82

10-1.MPV de sensores irradiados . . . . .	84
10-2.Voltaje de agotamiento contra flujo radioactivo . . . . .	85
10-3.Corriente de fugas vs voltaje inverso para <i>ROC</i> s expuestos a diferentes dosis de radiación. . . . .	86
10-4.Corriente generada por unidad de volumen vs dosis . . . . .	87
10-5.Máxima cantidad de carga medida en sensores sometidos a radiación. . . . .	88

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

La física experimental de altas energías, ha tenido un inmenso desarrollo en los últimos años. Nuevas técnicas de medida han aparecido a la par de sistemas más rápidos de medida y procesamiento de datos. La más notable muestra del desarrollo alcanzado es el recientemente inaugurado LHC, capaz de producir colisiones protón-protón con energías de 14 TeV nunca antes producidas en ningún experimento. La información obtenida permitirá llevar la física a una nueva frontera del conocimiento donde podrán confirmarse teorías parcialmente comprobadas como el modelo estándar así como sentar las bases para próximos desarrollos.

En la proeza de escudriñar las fronteras de la física, el instrumento de medida juega un papel fundamental. El detector CMS está diseñado para ser uno de los instrumentos que permitirá explorar la física más allá de sus límites actuales. El CMS es un aparato tan sofisticado y complejo que ha requerido del esfuerzo internacional para construirlo. Cuenta con una gran cantidad de detectores que permiten determinar parámetros físicos de las partículas provenientes de la colisión protón-protón.

Uno de los detectores más importantes y sofisticados es el detector de píxeles ubicado en el centro del CMS, compuesto por más de 65 millones de píxeles. Es capaz de determinar con una precisión de 10 micrómetros el lugar en el cual una partícula atraviesa el detector. La precisión del detector es menor que el tamaño de cada píxel ( $100\mu m \times 150\mu m$ ). Esto se logra gracias a que las partículas que atraviesan el detector activan varios píxeles y la información dada por cada píxel permite calcular con mucha mayor exactitud la posición de la partícula.

Cada píxel es independiente y tiene una señal de respuesta que necesita ser calibrada para conocer su equivalencia en energía depositada. También es necesario conocer las variaciones en la respuesta de los píxeles con el fin de conocer la resolución del detector. El experimento que será descrito en el capítulo 7, tiene como propósito determinar las variaciones en la calibración de la señal para los píxeles. Los resultados del experimento son presentados en el capítulo 8.

Otro aspecto importante en el detector de píxeles es la resistencia que tienen los sensores para soportar altas dosis de radiación, que tiene efectos destructivos sobre los sensores de silicio. En el capítulo 9, se describe el experimento realizado para encontrar los principales cambios macroscópicos en los sensores expuestos a radiación y en el capítulo 10, se muestran los resultados del mismo.

A lo largo de este trabajo se resumirán los aspectos teóricos utilizados durante el diseño y análisis de los experimentos anteriormente mencionados.

## Capítulo 2

# EL DETECTOR DE PÍXELES EN EL EXPERIMENTO CMS

La física de altas energías estudia los componentes elementales del universo, muchos de los cuales están predichos teóricamente sin sustento experimental hasta el momento. La teoría que describe los fenómenos al nivel de las partículas elementales no está completamente terminada y requiere de la realización de experimentos avanzados como es el CMS.

El CMS es un experimento multi-propósito. Entre los principales objetivos del experimento está encontrar evidencia experimental que permita completar el modelo estándar, encontrar indicios de la composición de la materia oscura e indicios de las partículas supersimétricas. Para cumplir estos objetivos el experimento cuenta con un software avanzado para el análisis de datos así como con una inmensa capacidad de cómputo y un avanzado conjunto de detectores.

### 2.1. Detector CMS

El Solenoide Compacto de Muones (CMS) por sus siglas en inglés, es uno de los dos detectores principales dispuestos a lo largo del LHC; ubicado cien metros bajo tierra en la villa francesa Cessy y diseñado para trabajar con una luminosidad de  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Las colisiones generadas ocurrirán a una energía de 14 TeV produciendo en promedio 1000 partículas por colisión. Para detectar este enorme flujo

de partículas el CMS cuenta con una serie de detectores especializados con diferentes propósitos y con un potente solenoide superconductor que genera un campo magnético de 4 Tesla de intensidad. Un esquema de la distribución de los detectores es mostrado en la figura 2-1.

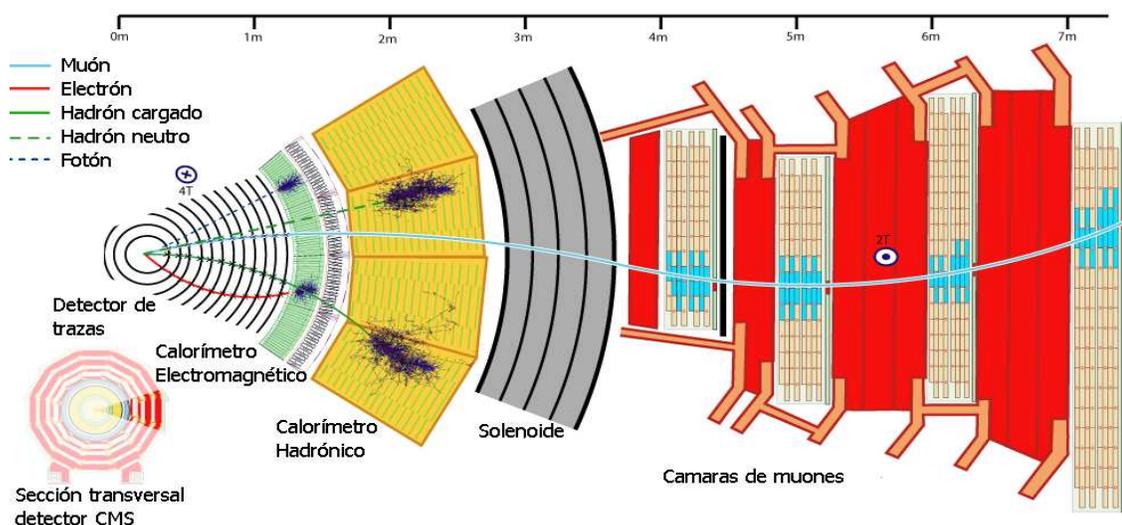


Figura 2-1: Configuración del detector CMS [1].

El detector está construido en forma cilíndrica en una configuración similar a una cebolla, en la cual los detectores externos envuelven a los más pequeños. El detector más alejado del centro de la colisión se encarga de detectar muones. Éste envuelve al solenoide que a su vez cubre al calorímetro hadrónico y el calorímetro electromagnético. Este último cubre al detector de trazas.

## 2.2. El detector de trazas

Este detector es uno de los más importantes dentro del experimento CMS ya que se usa para determinar el momentum de las partículas provenientes de la colisión. El detector de trazas trabaja bajo la influencia de un campo magnético de

4T. Está construido con material de baja densidad con el fin de evitar afectar la trayectoria de las partículas durante su detección.

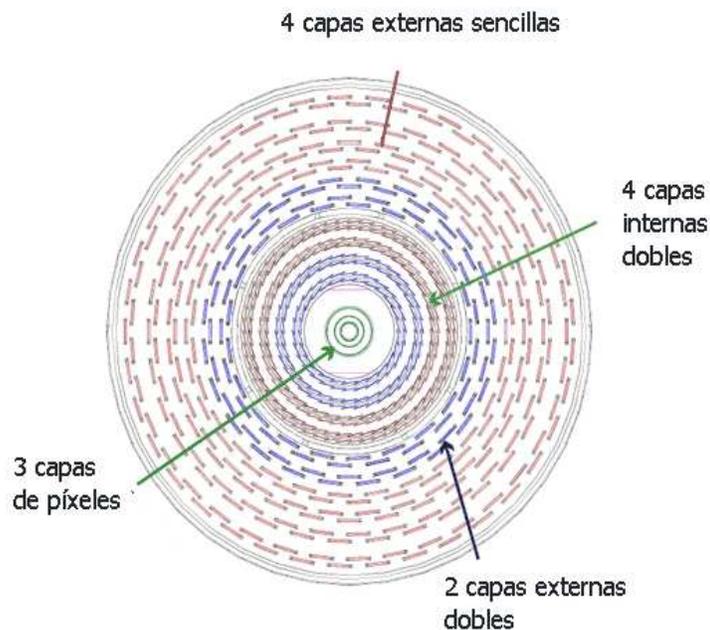


Figura 2-2: Capas del detector de trazas [1].

El detector está dividido en dos subdetectores como puede verse en la figura 2-2. El más grande es llamado *silicon strip*. Contiene 10 capas en el barril, sobre las cuales se encuentra una serie de sensores de silicio, diseñados como largos implantes de silicio tipo  $P+$  sobre un sustrato tipo  $N$ . Las tiras de material tipo  $P$ . Son las que le dan el nombre al detector. El segundo subdetector es llamado detector de píxeles y será explicado en la siguiente sección.

### 2.3. Detector de píxeles

Los píxeles componen la parte del detector de trazas correspondiente a las tres primeras capas. Es el detector más cercano a la colisión y provee el mayor grado de precisión al medir la posición de las partículas que lo atraviesan.

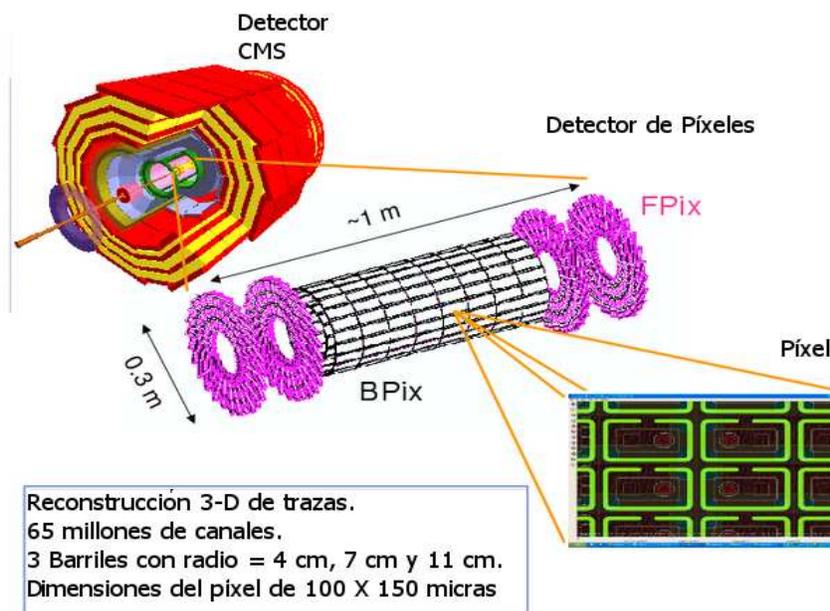


Figura 2-3: configuración del detector de píxeles [2].

Consta de tres capas concéntricas y dos tapas del cilindro a cada lado como muestra la figura 2-3. El cilindro más interno tiene un radio de 4 cm y los siguientes tienen un radio de 7 y 11 cm respectivamente. Cada capa posee una estructura mecánica hecha en fibra de carbono muy liviana y resistente. Cada estructura monta sobre sí una serie de módulos rectangulares que soportan los sensores de silicio, así como la electrónica requerida para el control y lectura de los sensores.

### 2.3.1. El módulo

Los módulos son arreglos de 16 sensores dispuestos en 2 filas y 8 columnas con los respectivos *chips* de lectura llamados *ROC*. El módulo soporta las conexiones eléctricas entre *ROCs* y también proporciona soporte para la alimentación de los circuitos electrónicos.

Cada módulo cuenta con un circuito integrado llamado TBM (*Token Bit Manager*). Este circuito sincroniza la lectura de cada ROC y transfiere la señal con la información de la dirección de cada píxel al exterior del barril. Las señales analógicas eléctricas son traducidas a señales ópticas para transportarlas hacia el exterior del detector.

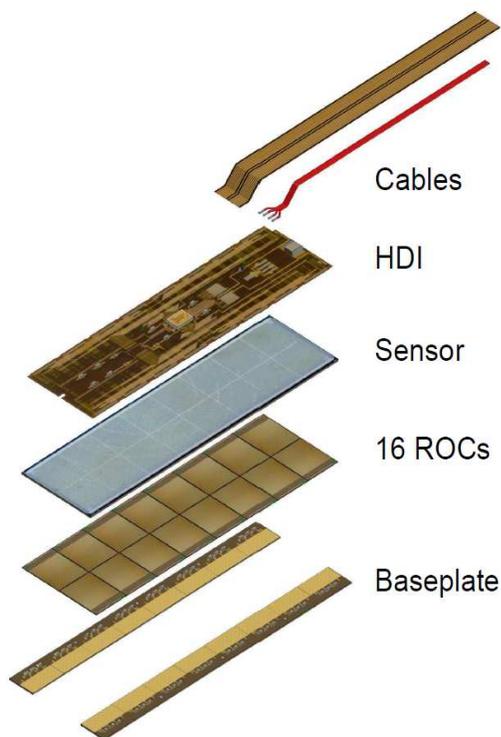


Figura 2-4: Piezas principales de un módulo del detector de píxeles [3].

La figura 2-4 muestra un despiece del módulo. Las bases sirven como piezas de anclaje en la estructura del detector. Los ROC van unidos al sensor con soldaduras microscópicas unidas a cada píxel. La tarjeta HDI hecha con un polímero liviano resistente es el soporte mecánico de las conexiones. Los ROCs se unen a ella en los costados con el sensor entre la HDI y los ROCs. Los cables de alimentación y transferencia de datos van soldados a la tarjeta HDI.

## Capítulo 3

# CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR

El sensor es la parte activa del detector; es el encargado de detectar la interacción de la radiación con el silicio constituyente para emitir la señal que será recibida y transportada por la electrónica acoplada. Un esquema del sensor se muestra en la figura 3-1.

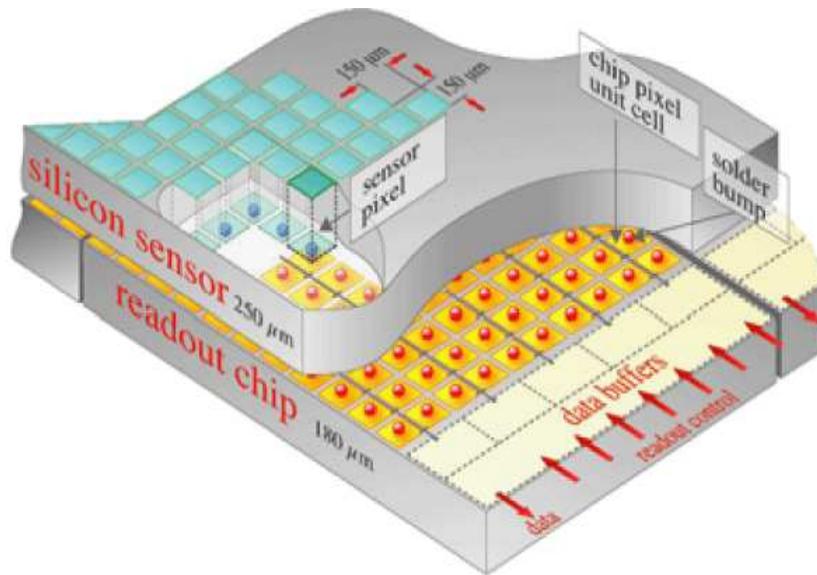


Figura 3-1: Detalle del sensor del detector de píxeles [4].

Consiste en un sustrato de silicio tipo N de  $270\mu m$  de espesor, con implantes tipo  $N+$  rectangulares con dimensiones de  $150 \times 100\mu m$  formando un cuadrículado que contiene 4160 implantes, donde cada implante constituye un píxel. Cada uno de los píxeles está conectado al *ROC* mediante una técnica llamada *Bump Bonding*.

En el presente capítulo se desarrollarán los conceptos básicos de detectores de silicio que permitirán entender de manera más profunda el principio de funcionamiento del sensor y el comportamiento del mismo bajo condiciones de trabajo.

### 3.1. Modelo de bandas

El modelo de bandas es ampliamente utilizado para explicar algunas propiedades de los materiales. Ayuda a comprender el comportamiento que tiene el silicio debido a su estructura cristalina [5]. El modelo de bandas se explica mediante una representación gráfica mostrada en la figura 3–2, en la cual el eje horizontal representa distancia y el eje vertical representa la energía que tienen los portadores de carga dentro del silicio.

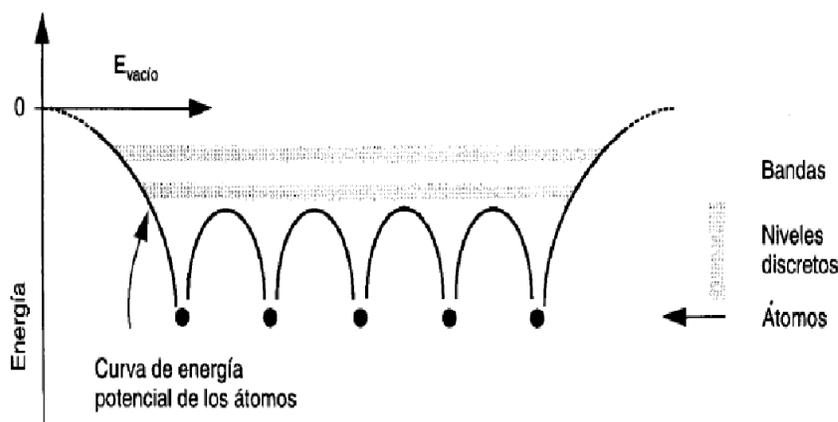


Figura 3–2: Modelo de bandas [5].

La energía potencial del electrón más cercano al núcleo de un átomo tiene el nivel más bajo de energía asequible para cualquier electrón dentro del cristal. De aquí en adelante se representan los niveles de energía como líneas separadas a baja energía y muy juntas al final de la gráfica. Muy cerca de  $E = 0$  los electrones tienen una infinidad de estados posibles y éstos pueden ser considerados como electrones libres. Los electrones que están debajo de este nivel están bien separados del nivel

correspondiente a  $E = 0$ . Esos electrones están ligados al cristal y sólo podrán salir del estado ligado si absorben una cantidad igual o mayor a la energía que los tiene confinados. A la diferencia entre el nivel  $E = 0$  libre (banda de conducción) y el nivel ligado (banda de valencia), se le llama *gap* o banda prohibida.

El tamaño de esta banda es lo que diferencia un conductor de un aislante y de un semiconductor. En el caso de los metales, la diferencia entre bandas es cero y los electrones de valencia están mezclados con los electrones de conducción; ésto hace buenos conductores a los metales. Para los aislantes este ancho entre bandas es muy grande y por lo tanto es muy poco probable que un electrón esté disponible para transportar carga. En el caso intermedio se encuentra el silicio, con una capacidad reducida de transportar electricidad, pero suficiente para que, con bajos niveles de energía, se produzca conducción.

### 3.2. Principio de funcionamiento de detectores de silicio

En la actualidad el silicio es una solución relativamente económica para la producción de sensores. Resulta apropiada su utilización en experimentos que requieren precisión y rapidez en sus medidas. El silicio, perteneciente al grupo IV de la tabla periódica, forma enlaces covalentes compartiendo sus cuatro electrones de valencia con los átomos circundantes como ilustra la figura 3-3.

La separación entre la banda de conducción y la banda de valencia es muy pequeña (1.2 eV) en el silicio, lo que hace que se requiera de muy poca energía para elevar un electrón de valencia a la banda de conducción.

Debido a que no hay electrones que puedan suplir con facilidad el vacío dejado por el electrón se genera un espacio faltante denominado hueco. Éste posee características similares a las de un portador de carga. Al aplicar un campo eléctrico externo puede moverse dentro del cristal en dirección del campo eléctrico y se puede

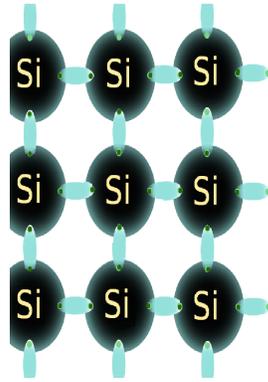


Figura 3-3: Modelo bidimensional del silicio.

considerar como un portador de carga positiva. Así la ausencia del electrón dentro de la banda de valencia se considera portador de carga.

### 3.2.1. Cristales de silicio tipo P

La figura 3-4 corresponde a la inserción de una impureza de Boro dentro del cristal de silicio. Comparte sus tres electrones de valencia con los átomos de silicio que lo rodean, dejando un enlace faltante.

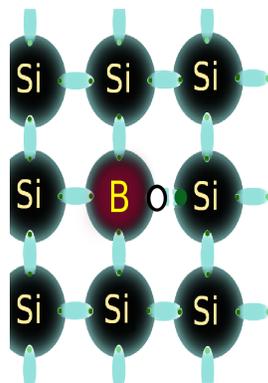


Figura 3-4: Modelo bidimensional del silicio tipo P.

El enlace covalente faltante se comporta como un hueco, representado como un círculo blanco en la figura. Un electrón cercano a un átomo de silicio ocupa este

hueco, dejando tras de sí un espacio libre; de esta forma se produce la conducción en un material tipo P. Este material es denominado aceptor ya que recibe con facilidad a los portadores de carga negativos.

### 3.2.2. Silicio tipo N

La figura 3-5, muestra la estructura cristalina del silicio con una impureza de fósforo con 5 electrones de valencia. En esta condiciones el fósforo comparte cuatro de sus electrones de valencia en hacer el enlace covalente con los átomos de silicio a su alrededor. El quinto electrón queda ligado débilmente al cristal, sirviendo como un portador.

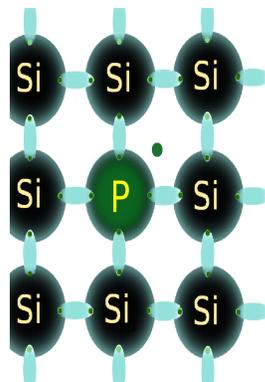


Figura 3-5: Modelo bidimensional del silicio tipo N.

A temperatura ambiente casi todos los portadores que han aportado las impurezas se encuentran en banda de conducción y el material se comporta como un conductor.

### 3.2.3. Unión P-N

Se puede construir una imagen de la unión P-N como dos materiales separados por una línea infinitesimal que los divide, pero a través de la cual pueden pasar

portadores de carga, es decir huecos y electrones. Estos dos materiales son tipo P y tipo N como muestra la figura 3-6.

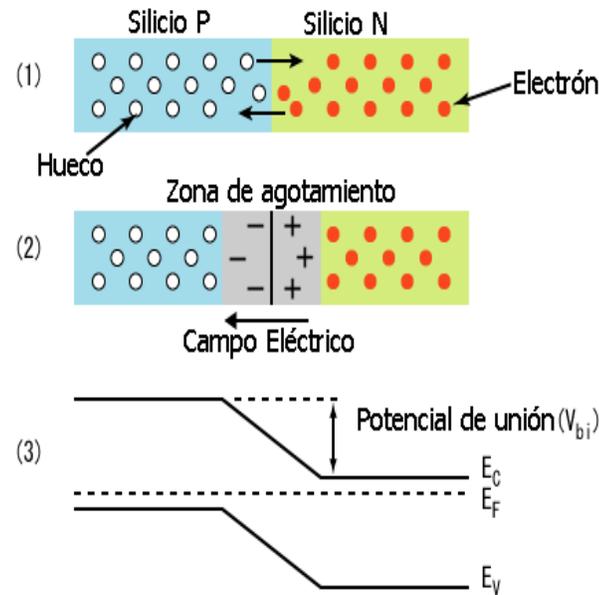


Figura 3-6: Modelo de la unión P-N [5].

Esto genera cerca de la zona de unión una región con características diferentes al resto del material. Los materiales se diferencian en la energía requerida para que un electrón pase de banda de valencia a banda de conducción y viceversa. A temperatura ambiente la mayoría de las impurezas se encuentran ionizadas [5]. Esto ocasiona un movimiento de portadores a través de la unión. Un electrón libre en la zona N puede ser atrapado fácilmente en la zona P. El ión que se queda en la zona N tiene carga positiva mientras que el átomo que recibe al electrón en la zona P está ahora ionizado negativamente. Ésto se traduce en la aparición de un campo eléctrico en la unión en dirección de la zona N a la zona P. Sin embargo, el electrón portador en la zona N se ha movido a la zona P y ha desaparecido causando a la vez la desaparición del hueco portador en la zona P. O sea, en la región cercana a la unión no hay portadores libres y por eso se le llama zona de agotamiento.

Esta región tiene un límite de tamaño. Mientras más crece la zona es más difícil para un portador atravesar la barrera. Si un electrón libre de la zona N se dirige hacia la zona P, se enfrentará a un campo eléctrico en la misma dirección y como los electrones se mueven contrario a la dirección de las líneas de campo, éste será repelido. Esto impone un límite al tamaño de la zona, pues sólo electrones con energía mayor al potencial generado en la zona de agotamiento logran atravesar la barrera.

### 3.3. Características del sensor de píxeles

El sensor del detector de píxeles debe ser capaz de trabajar bajo condiciones de alta radiación, con un voltaje inverso aplicado de más de 200 V y un campo de 4 T. Estas condiciones de trabajo hacen que sea necesario utilizar un diseño particular el cual es explicado a continuación.

#### 3.3.1. Unión $N+$ en N para el sensor de píxeles

Un modelo del sensor se puede ver en la figura 3-7. El sensor consiste en una serie de implantes  $N+$  en un sustrato N, a la cual se une una capa de silicio tipo P en la parte opuesta a los implantes. También cuenta con implantes tipo P que apantallan el píxel rodeando el implante  $N+$  en una estructura conocida como *p-stop*. La función de los implantes es reducir la capacitancia del sensor y reducir el ruido en el píxel.

Por otro lado el píxel puede ser visto como un diodo polarizado inverso, con dos uniones dentro de su volumen. La primera de ellas producida por la unión del material tipo  $N+$  y el sustrato N, la segunda por el sustrato N y la superficie posterior de contacto que es material tipo P.

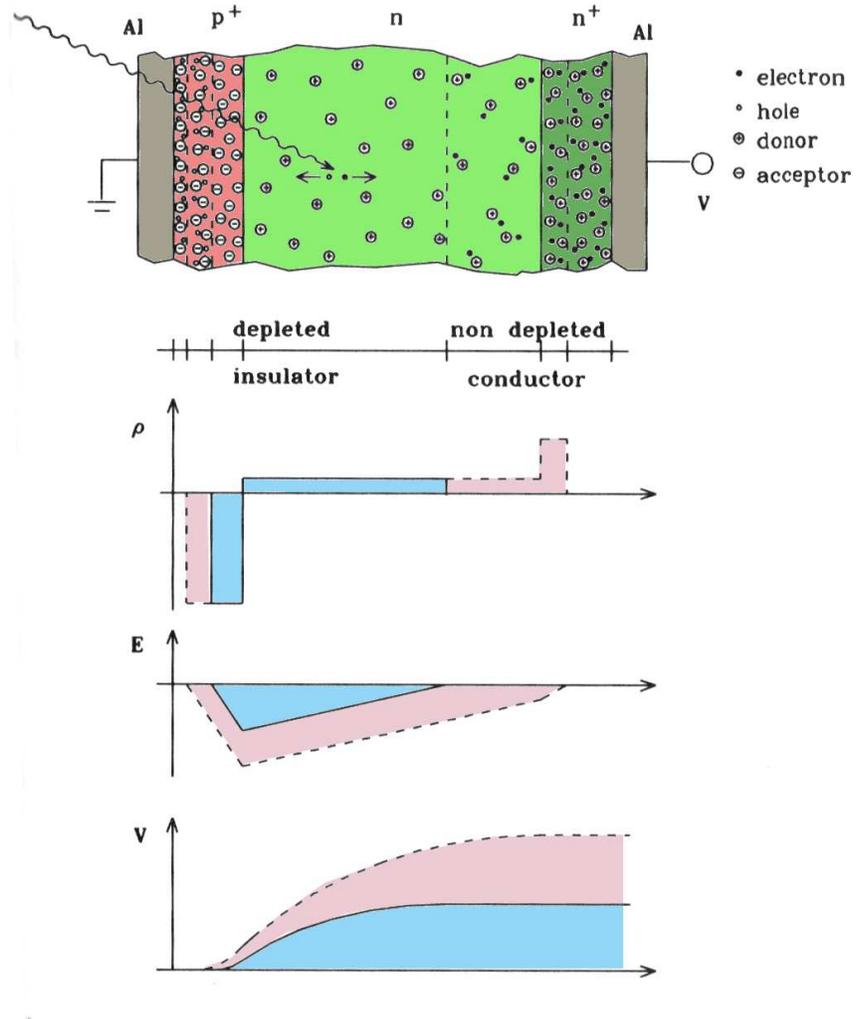


Figura 3-7: Modelo de las uniones en un píxel N en  $N^+$  [6].

La configuración del sensor hace que los efectos dañinos de la radiación actúen principalmente sobre el sustrato que sufre un proceso denominado *type inversion*. El material lentamente se convierte a un material tipo P conforme aumenta la dosis de radiación absorbida. La existencia de estas dos uniones permite que la zona de agotamiento llene fácilmente el volumen del sustrato, incluso aplicando voltajes inversos bajos.

### 3.3.2. Concentración de oxígeno en el sustrato del sensor

Mediante la técnica de producción de silicio, llamada difusión de oxígeno en zona flotante (DOFZ) por sus siglas en inglés, (desarrollado por el equipo de *ROSE collaboration* [8]), se consigue silicio con una alta concentración de átomos de oxígeno, cuya principal característica es ser resistente a los efectos que produce la exposición a radiación no ionizante (NIEL).

El silicio utilizado en la construcción del detector es producido mediante esta técnica. Tiene una concentración de átomos de oxígeno del orden de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  que se logra manteniendo las obleas de silicio producidas a una temperatura aproximada de  $1100^\circ\text{C}$  por más de 48 horas bajo una atmósfera inerte.

## 3.4. Ángulo de Lorentz

El sensor trabaja en un campo de 4 T y con un voltaje inverso de 200 V. Estas condiciones de trabajo son aprovechadas para mejorar la resolución del detector utilizando el concepto de carga compartida.

Cuando una partícula atraviesa el detector pierde energía y libera pares electrón-hueco dentro del silicio a lo largo de su trayectoria. Las cargas generadas se

encuentran bajo condiciones que afectan el camino que seguirán a través del material, antes de ser recolectadas por el píxel. Un esquema de una situación típica se muestra en la figura 3-8.

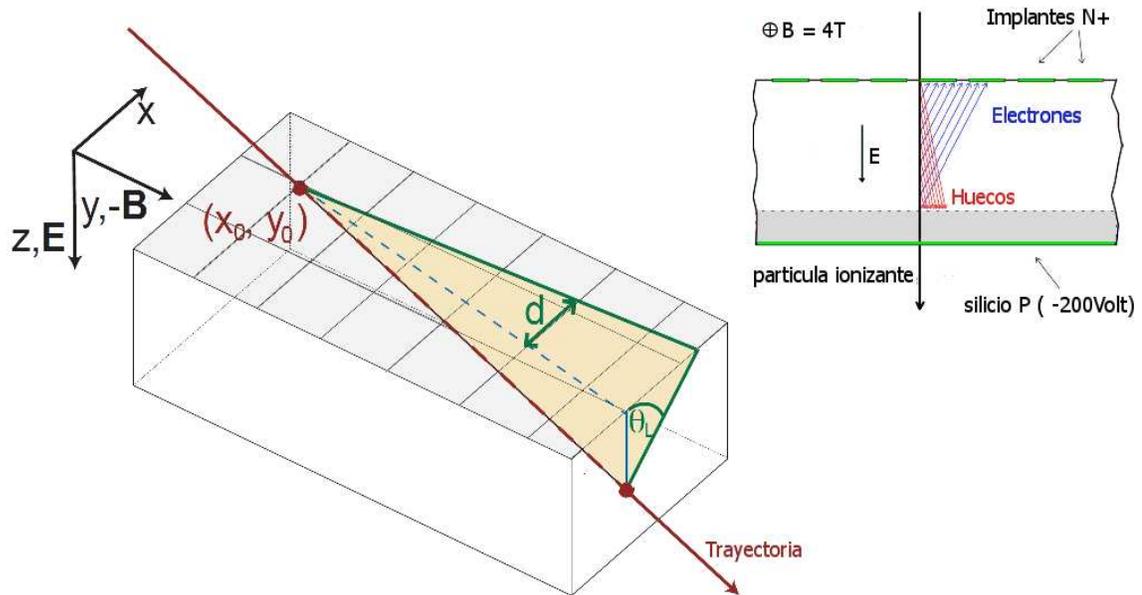


Figura 3-8: Trayectoria probable dentro de un segmento del detector de píxeles [7].

Las cargas generadas en el volumen del píxel son afectadas por el campo de polarización del píxel y el campo magnético producido por el solenoide. Las cargas generadas siguen una trayectoria que forma un ángulo  $\theta_L$  respecto a la dirección del campo eléctrico, el resultado de este efecto es que una partícula activa una mayor cantidad de píxeles debido al efecto combinado de los campos magnético y eléctrico. Al conocer la distribución de la carga generada dentro de la grilla que forman los píxeles, se calcula con mayor precisión la ubicación del lugar donde la partícula cargada interactuó con el silicio [7].

Los campos magnético y eléctrico son perpendiculares entre sí como muestra la figura 3-8. La trayectoria de deriva de las cargas tiene un ángulo respecto al eje Z

que es la dirección del llamado ángulo de Lorenz  $\Theta_L$ . La relación está determinada por la ecuación 3.1 [9].

$$\text{Tan}(\Theta_L) = \mu_H \cdot |\vec{B}| \quad (3.1)$$

Donde  $\mu_H$  es la movilidad de Hall para el silicio. Por definición la movilidad está dada por el cociente de la velocidad de deriva y la magnitud del campo eléctrico como muestra la ecuación 3.2 [10].

$$\mu_0 = \left| \frac{v_d}{\xi} \right| \quad (3.2)$$

La movilidad depende de la concentración efectiva de portadores dentro del material como muestra la ecuación empírica 3.3. Las variables  $\mu_1$  y  $N_{eff}$  dentro de esta ecuación son obtenidas empíricamente, así como del número de impurezas  $N$ .

$$\mu = \mu_0 + \frac{\mu_1}{1 + \frac{N}{N_{eff}}\alpha} \quad (3.3)$$

En resumen la existencia del ángulo de Lorentz incrementa la resolución del detector y este depende de las características del material al cambiar las características físicas del sensor este ángulo es afectado.

## Capítulo 4

# EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LOS SENSORES DE PÍXELES

Los sensores de píxeles tienen una función muy importante en determinar la traza de las partículas provenientes de la colisión. Juegan un papel muy importante en la reconstrucción de los vértices primarios y secundarios gracias a que cuentan con la capacidad de determinar con precisión la posición de las partículas que atraviesan el silicio que constituye el sensor. Ésta es la razón por la que fue escogido para estar ubicado en la zona más cercana a la colisión. Esto representa un reto técnico importante, pues los sensores son relativamente frágiles frente a los daños que puede causar la radiación en altas dosis. Es importante determinar los efectos de la radiación sobre los sensores que han de utilizarse y la velocidad con la que estos cambios ocurren.

### 4.1. Interacción de la radiación con el silicio

Las partículas que interactúan con el sensor pierden energía por medio de diferentes mecanismos. En general se pueden separar en dos grupos: pérdida de energía ionizante (IEL) y pérdida de energía no ionizante (NIEL). La cantidad de energía depositada en el silicio depende de las características físicas de las partículas incidentes, principalmente el tipo de interacción que puede tener con los átomos de silicio. También depende de su masa y su energía. Cada proceso tiene relevancia en diferentes aspectos del funcionamiento del detector. Por ejemplo, los procesos IEL

permiten realizar las medidas de la posición de las partículas que cruzan el detector así como realizar diferentes calibraciones.

En el caso de la pérdida de energía por procesos NIEL, éstos tienen efectos destructivos sobre la configuración cristalina del detector y afectan el desempeño del mismo. El daño se incrementa a medida que recibe un mayor flujo de partículas.

#### 4.1.1. Generación de pares electrón-hueco mediante procesos IEL

Los procesos de ionización son estadísticos. Para partículas cargadas incidentes con energía en el rango típico de CMS, el número promedio de pares electrón-hueco generados en un píxel es aproximadamente independiente de la masa de la partícula incidente [6]. En promedio la energía necesaria para generar un par electrón-hueco en el silicio es de aproximadamente 3.6 eV [11], casi tres veces el ancho de la banda prohibida, (*band gap*). De tal manera existe una relación simple entre la energía depositada en el material y el número de pares generados.

$$N = \frac{E}{3,6 \cdot eV} \quad (4.1)$$

La dispersión estadística está dada por el factor de Fano (F) multiplicado por la cantidad media de pares generados (ecuación 4.2). El factor de Fano es aproximadamente 0.117 para el silicio.

$$\langle \Delta N^2 \rangle = F \cdot \frac{E}{3,6eV} \quad (4.2)$$

### 4.1.2. Pérdida de energía por procesos de ionización

Las partículas cargadas que interactúan con el detector de trazas atraviesan al mismo dejando una pequeña parte de su energía en el silicio al ionizar los átomos y generar pares de electron-hueco. La medida de esta energía es utilizada para reconstruir su trayectoria.

El tratamiento cuántico de la ionización de un material por partículas cargadas incidentes fue realizado por *Bethe - Bloch* [12], el cual da como resultado la ecuación 4.3:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left( \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 + \frac{\delta(\gamma)}{2} \right) \quad (4.3)$$

Las variables componentes de la ecuación son las siguientes:

$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$  es la cantidad de energía perdida por unidad de longitud está dada en unidades  $\frac{eV}{g/cm^2}$ .

$$K = 4\pi N_{Av} r_e^2 m_e c^2 = 0,307075 MeV \cdot cm^2.$$

$z$  : es la carga de la partícula que atraviesa el silicio.

$Z = 14$  (número atómico del silicio.)

$A$  : masa atómica del silicio.

$\beta$  velocidad relativa respecto a la velocidad de la luz.

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  factor de Lorentz.

$I = 137eV$  energía media de excitación para el silicio.

$\delta(\gamma)$  Corrección factor de densidad.

Esta ecuación permite determinar el promedio de la cantidad de energía que una partícula cargada pierde al interactuar con los electrones del material.

### 4.1.3. Distribución de Landau

La ecuación 4.3 describe el valor promedio de la energía perdida por ionización, pero este es un proceso cuántico que es susceptible a fluctuaciones estadísticas; bajo condiciones idénticas no todas las partículas depositan la misma cantidad de energía. Si la partícula no es detenida dentro del material, la distribución estadística de las fluctuaciones está dada por la distribución de Landau.

La figura 4-1 muestra la distribución teórica para un sensor de silicio de espesor de  $270\mu m$  expuesto a radiación  $\beta$  con energía de 570 KeV, que es la energía promedio de una fuente de Sr 90.

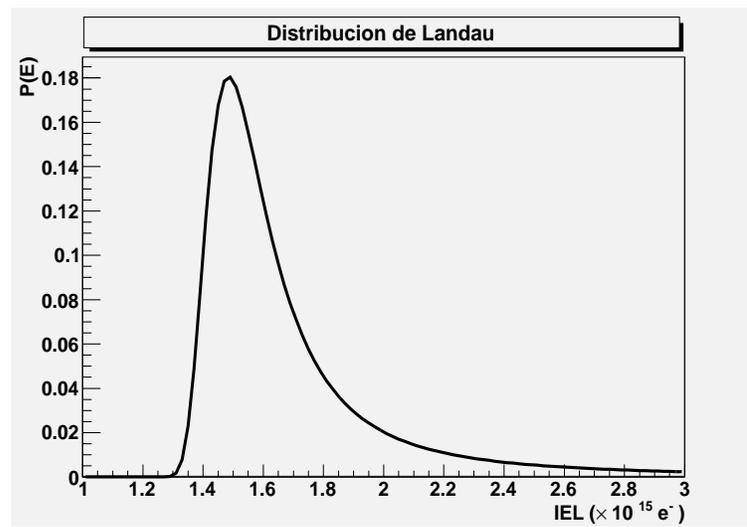


Figura 4-1: Distribución de Landau para  $270\mu m$  de silicio. El eje horizontal muestra la cantidad de pares electrón-hueco generados por ionización y el eje vertical la magnitud de la función de probabilidad.

La distribución de Landau no es una función elemental. El tratamiento hecho por Landau da como resultado la función 4.4 cuya integral no posee solución exacta. Para construir la gráfica se usa la aproximación mostrada en la ecuación 4.5 [13]:

$$\omega(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-v \cdot \ln(v-\lambda v)} \sin(\pi v) dv \quad (4.4)$$

$$\Omega(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}e^{\frac{1}{2}(\lambda+e^{-\lambda})}} \quad (4.5)$$

Donde  $\lambda = (E - E_{MPV}) / \xi$ ,  $\xi$  es una constante que vale 40.96 Kev para el silicio y  $E_{MPV}$  es el valor más probable (MPV) de energía depositada calculado usando la ecuación 4.6.

$$E_{MPV} = \xi \left( \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \xi}{I^2} - \beta^2 + 1 - \gamma E \right) \quad (4.6)$$

E es la energía de la partícula e I la constante de ionización, cuyo valor es de 0.173 KeV para el silicio.

#### 4.1.4. Interacción del silicio con radiación electromagnética

La interacción de la radiación electromagnética con la materia se produce por 3 tipos de procesos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. La intensidad de la radiación es atenuada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot x} \quad (4.7)$$

$I_0$  es la intensidad inicial, x es la masa por unidad de área calculado como  $x = \rho \cdot t$ , donde  $t$  es el espesor de la muestra y  $\mu/\rho$  es llamado coeficiente de atenuación. Este coeficiente resume información de todos los procesos mencionados calculándose de la siguiente forma:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{A} \sum_{i=1}^3 \sigma_i \quad (4.8)$$

Donde  $\sigma_i$  es cada sección eficaz de interacción para cada uno de los procesos y depende fuertemente de la energía del fotón, ya que cada proceso tiene un peso diferente en cada rango de energía. La gráfica 4-2 muestra la relación entre el coeficiente de atenuación y la energía de los fotones para el silicio.

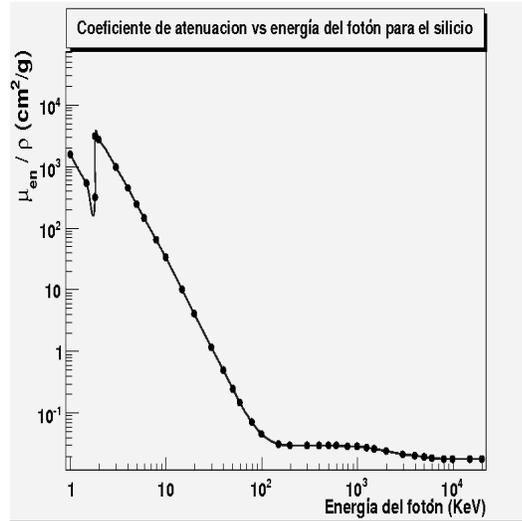


Figura 4-2: Coeficiente de atenuación para silicio ( $Z=14$ ). El eje horizontal muestra la energía del fotón incidente y el eje vertical la magnitud de coeficiente de atenuación. [14].

Utilizando el coeficiente de atenuación se define la longitud de atenuación, que es la longitud media para que un fotón sea absorbido por el material de acuerdo a la ecuación 4.9.

$$\chi = \frac{\rho}{\mu} \quad (4.9)$$

Para calcular la probabilidad de absorción de fotones en un material se utiliza la ecuación 4.10 [15].

$$P(x) = 1 - e^{-\frac{t}{\chi}} \quad (4.10)$$

En la tabla 4.1.4 se muestra el resultado del cálculo para la probabilidad de absorción de fotones provenientes de tres fuentes de rayos X que inciden sobre una muestra de silicio.

Tabla 4–1: Probabilidad de absorción para fotones de rayos X en un sensor de silicio con  $270\mu m$  de espesor.

<b>Metal</b>	<b>Energía pico <math>K_{\alpha}(KeV)</math></b>	$\chi(\mu m)$	$P(x)$
Mo	17.6	614	0.35
Ag	22.3	1430	0.18
Ba	32.5	3450	0.09

## 4.2. Pérdida de energía mediante procesos NIEL

La pérdida de energía NIEL ocurre generalmente mediante procesos de interacción de las partículas incidentes con los núcleos de los átomos del material. Estos procesos pueden resultar dañinos para la estructura cristalina de los sensores de silicio, ya que una partícula con suficiente energía puede desplazar el núcleo atómico de su posición en la red cristalina ocasionando defectos dentro de la estructura del cristal. Dependiendo de la partícula incidente y de la energía de la misma, se pueden crear defectos puntuales o complejos de defectos.

### 4.2.1. Mecanismo de daño en el silicio cristalino por procesos NIEL

Los defectos puntuales son lugares donde la estructura cristalina queda deformada por el desplazamiento de un núcleo atómico. Los complejos de defectos son zonas donde se puede considerar que el material ha perdido su estructura cristalina y es un material amorfo. La energía necesaria para crear cada uno de estos defectos se muestra en la tabla 4.2.1 [6], donde  $T_{Max}$  es la máxima energía transferida a un

núcleo después de un proceso de interacción,  $T_{pro}$  es la energía promedio y  $E_{min}$  es la energía mínima para crear un defecto puntual o un complejo de defectos.

Tabla 4-2: Características energéticas de la interacción de electrones, protones, neutrones y núcleos de silicio en un cristal de silicio.

Partícula incidente	Electrones	Protones	Neutrones	Núcleos de silicio
Interacción	Dispersión de Coulomb	Dispersión de Coulomb	Dispersión elástica	Dispersión de Coulomb
$T_{Max}(KeV)$	0.155	133.7	133.9	1000
$T_{pro}(KeV)$	0.046	0.210	50	0.265
$E_{min}(KeV)$ defectos puntuales	260	0.190	0.190	0.025
$E_{min}(KeV)$ complejos de defectos	4600	15	15	2

El mecanismo de daño en el material consiste en la incidencia de una partícula sobre un núcleo en la red cristalina. Al desplazarse este núcleo a través del material produce defectos puntuales a lo largo de la trayectoria. Dentro de esa trayectoria también puede desplazar núcleos adicionales dentro del material.

En la tabla 4.2.1 se ve que la energía que requiere un núcleo para causar daño es relativamente baja. Es por este motivo que el final de la trayectoria es la zona donde mayor daño es causado, creando un complejo de defectos como muestra la figura 4-3

#### 4.2.2. Cuantificación del daño en sensores usando unidades NIEL

El daño producido en sensores de silicio por la radiación es ocasionado principalmente por núcleos que se mueven dentro de la red cristalina después de sufrir

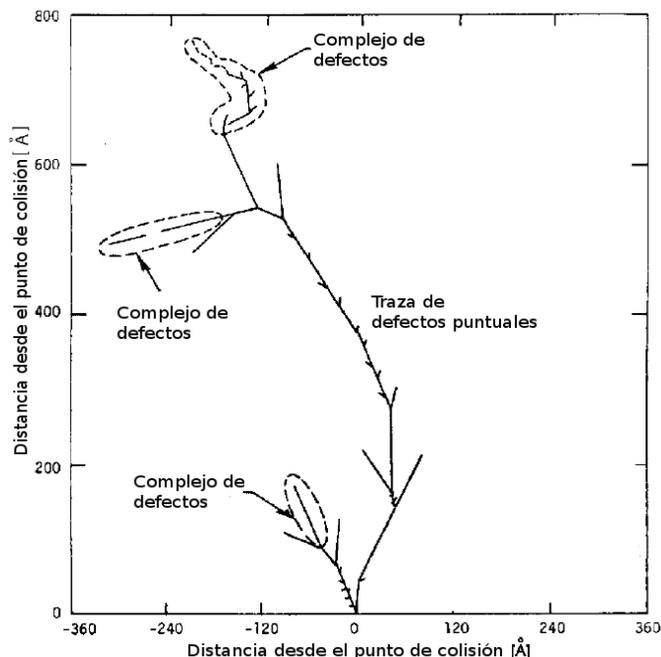


Figura 4-3: Simulación del efecto de un núcleo de silicio de energía cinética de 50 KeV después de ser impactado por un neutrón con energía cinética de 1MeV. [16].

procesos de dispersión con otras partículas. Independientemente de la naturaleza de las partículas, el efecto de tener un núcleo desplazándose por el material es el mismo.

Las unidades en las cuales está cuantificado el daño producido están relacionadas con diversas medidas experimentales [17]. El daño producido por partículas que sufren interacción con los núcleos, es equivalente al daño producido por determinada cantidad de neutrones incidiendo con energía cinética de 1 MeV sobre los núcleos de la red cristalina. La figura 4-4 muestra la sección eficaz en unidades normalizadas para neutrones equivalentes con energía cinética de 1 MeV.

Las unidades NIEL son recomendadas para cuantificar el daño recibido en los sensores de silicio al recibir flujos de radiación [19]. Al multiplicar el flujo de partículas por la sección eficaz, se calcula la equivalencia en flujo de neutrones equivalente.

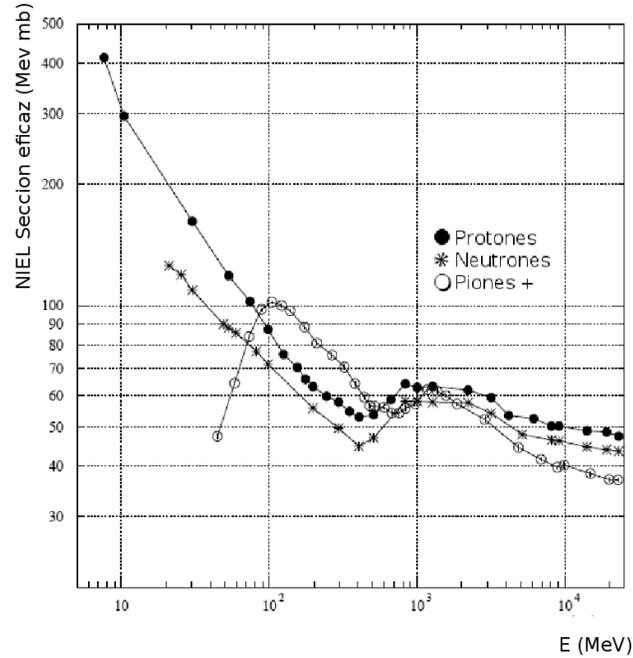


Figura 4-4: Sección eficaz para partículas normalizadas equivalentes al daño producido por neutrones con energía cinética de 1 MeV sobre silicio cristalino. [18].

#### 4.2.3. Proceso de Inversión

Al ser los píxeles los detectores ubicados más cerca al punto de colisión entre los haces en CMS, recibirán las más grandes dosis de radiación. Las partículas que atraviesan este detector pueden interactuar directamente con los núcleos de los átomos y romper la configuración cristalina del silicio. Este efecto resulta altamente destructivo para el silicio debido a que las propiedades del material utilizado en el detector dependen de su estructura cristalina.

Los defectos producidos por la deformación de las estructuras cristalinas son llamados vacancias, las cuales actúan como centros de recombinación en los cuales el número de portadores es diferente al resto del material, así como el ancho de la banda prohibida que depende de la distancia de separación entre los átomos en la red cristalina. Este es el motivo por el cual el sensor del detector de píxeles tiene un diseño especial, al no estar basado en una unión P en N, sino en una unión  $N^+$  en

N, donde el material N es un tipo de silicio producido mediante la técnica DOFZ, que se convierte en un material tipo P debido al efecto de la radiación.

#### 4.2.4. Voltaje de operación en sensores irradiados

Los sensores construidos con la técnica DOFZ después de ser irradiados con flujos superiores a  $10^{12} \text{Neq} \cdot \text{cm}^{-2}$  presentan cambios en la concentración de impurezas efectivas que actúan como dopantes.

Las impurezas originales se encuentran capturadas en complejos de defectos dentro del cristal, en los cuales pierden su función como donadoras. Al reaccionar estos complejos con el oxígeno presente en el material se comportan como impurezas aceptoras, convirtiendo el material gradualmente en un sustrato tipo P. El cambio en la concentración de portadores en función del flujo radioactivo (NIEL) para diferentes concentraciones de oxígeno en el material puede verse en la figura 4-5.

El voltaje de operación es proporcional a la densidad de portadores presentes en el material como muestra la ecuación 4.11.

$$V_{dep} = \frac{qN_A d_{dep}^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} - V_{bi} \quad (4.11)$$

Donde  $N_A$  es el número de impurezas aceptoras,  $N_D$  número de impurezas donadoras y  $d_{dep}$  es el grosor de la zona de agotamiento. El voltaje de la unión  $V_{bi}$  está dado por la ecuación 4.12, donde  $n_i$  es la concentración total de impurezas.

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (4.12)$$

La dependencia entre el voltaje de operación y la concentración de portadores permite estimar el deterioro sufrido por el detector. Para flujos mayores a  $10^{12} \cdot \text{Neq} \cdot \text{cm}^{-2}$  el material sufre el proceso de inversión (figura 4-5).

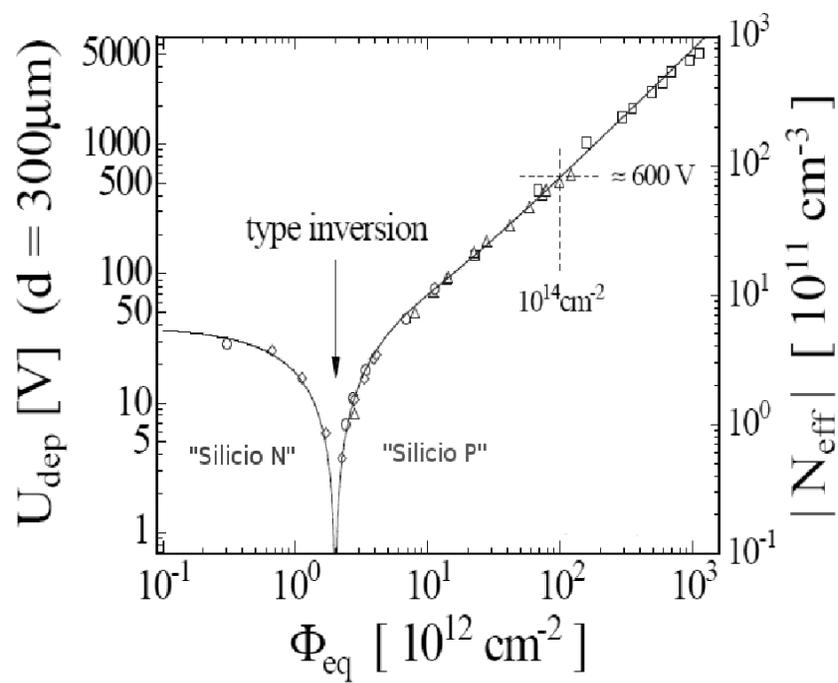


Figura 4-5: Concentración de portadores en función del flujo radioactivo (NIEL). [14].

#### 4.2.5. Efecto en la corriente de fugas

Uno de los efectos más evidentes de la radiación sobre los sensores es un incremento en la corriente de fugas y un cambio en el comportamiento de la misma respecto al voltaje inverso aplicado. Esto ocurre principalmente por dos factores:

**Centros de recombinación:** Estos defectos localizados en el volumen del detector atrapan electrones o huecos durante un tiempo mucho mayor. Conforme estos se hacen más frecuentes y en estados normales de trabajo aparecen espontáneamente cargas generadas que se leen como corrientes de fuga.

**Proceso *type inversion*:** Los defectos combinados con el oxígeno tienen energías de la banda prohibida menor. Esto se traduce en una producción mayor de pares electrón-hueco debido a que se requiere una energía menor para generarlos.

La corriente también depende del voltaje inverso aplicado. De acuerdo a lo presentado en la sección anterior el voltaje debe ser ajustado conforme el daño producido por la radiación se incrementa. La corriente de fugas cumple que  $I_{bulk} \sim W \sim \sqrt{V}$  para  $V \leq V_{dep}$ . El incremento de la corriente de fugas es proporcional a la dosis recibida por el sensor y esta dependencia está dada por la ecuación 4.13 [6].

$$\frac{\Delta I}{Volumen} = \alpha \Phi \quad (4.13)$$

## Capítulo 5

# ELECTRÓNICA ACOPLADA

Cada sensor del detector de píxeles requiere tener una serie de componentes electrónicos que permitan leer la cantidad de carga generada por una partícula al cruzar por el silicio que lo constituye. La velocidad de lectura requerida, así como la enorme cantidad de canales que se manejan por cada módulo del detector, hacen que esta tarea tenga un elevado nivel de complejidad. Son necesarios aproximadamente 250 transistores por cada píxel, los cuales tienen un alto nivel de integración y cumplen diversas funciones las cuales serán explicadas a continuación.

### 5.1. Chip de lectura del sensor psi46

Cada sensor tiene un circuito electrónico acoplado llamado *ROC*. Este circuito está encargado de controlar 4160 píxeles de forma independiente y decodificar la dirección de cada píxel para que la señal de salida contenga información suficiente para identificar el píxel de donde proviene el *hit*, así como la magnitud de la misma.

El exceso de carga generada dentro de un píxel es recolectada y almacenada temporalmente en un condensador acoplado. Esta cantidad de carga es leída como una señal de voltaje que debido a su magnitud debe ser amplificada y filtrada previamente antes de ser transmitida. La figura 5-1 muestra un diagrama de bloques de los circuitos internos de un *ROC*.

El *ROC* posee diferentes bloques de circuitos para tratar la señal. El primero de ellos es la celda unitaria del píxel *PUC*, que es la electrónica especializada más

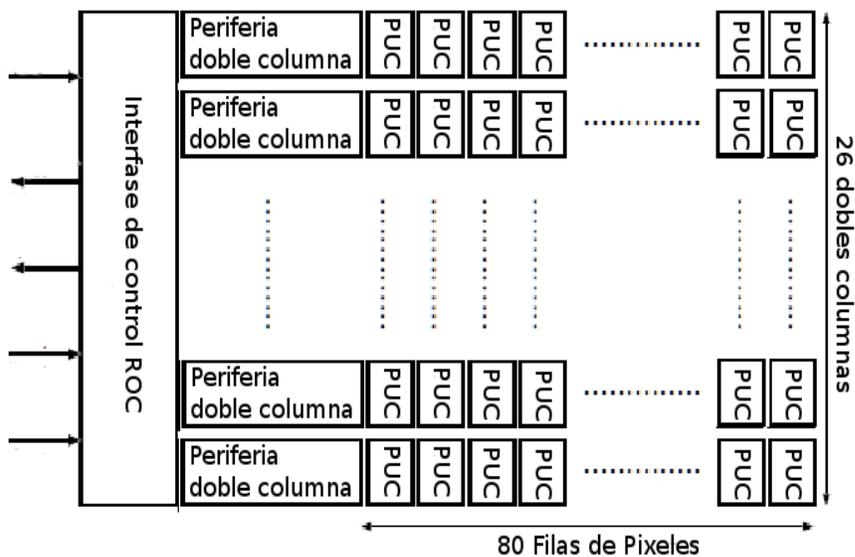


Figura 5-1: Diagrama de bloques del *ROC* [20]

cercana a cada píxel. La siguiente etapa es llamada periferia de la doble columna, que se encuentra cerca de los bordes del *ROC*. Cada doble columna cuenta con 2 filas de 80 píxeles.

Esta configuración permite aumentar la velocidad de lectura del *ROC* pues esta doble columna funciona de forma independiente del resto de los circuitos y se encarga de leer 160 píxeles constantemente. El último bloque corresponde a la interfase del *ROC* la cual es manejada por el *TBM*.

### 5.1.1. Electrónica acoplada a cada píxel

El píxel es la unidad fundamental de cada uno de los módulos; es decir no se posee unidad sensible más pequeña. Cada píxel debe funcionar independientemente y posee cierto nivel de autonomía para conseguir una velocidad de lectura apropiada. Debido a que el LHC hará colisionar paquetes de protones cada 25 ns, el píxel debe

tener la capacidad de diferenciar entre las partículas provenientes de cada paquete de protones de forma independiente.

Para reducir la cantidad de datos almacenados, cada píxel requiere de un circuito que permita determinar si la señal generada corresponde a una excitación externa (una partícula cargada atravesando el píxel), o es producto del ruido en el sensor. También es necesario acondicionar la señal para que pueda ser almacenada correctamente. Un esquema del circuito acoplado se muestra en la figura 5-2.

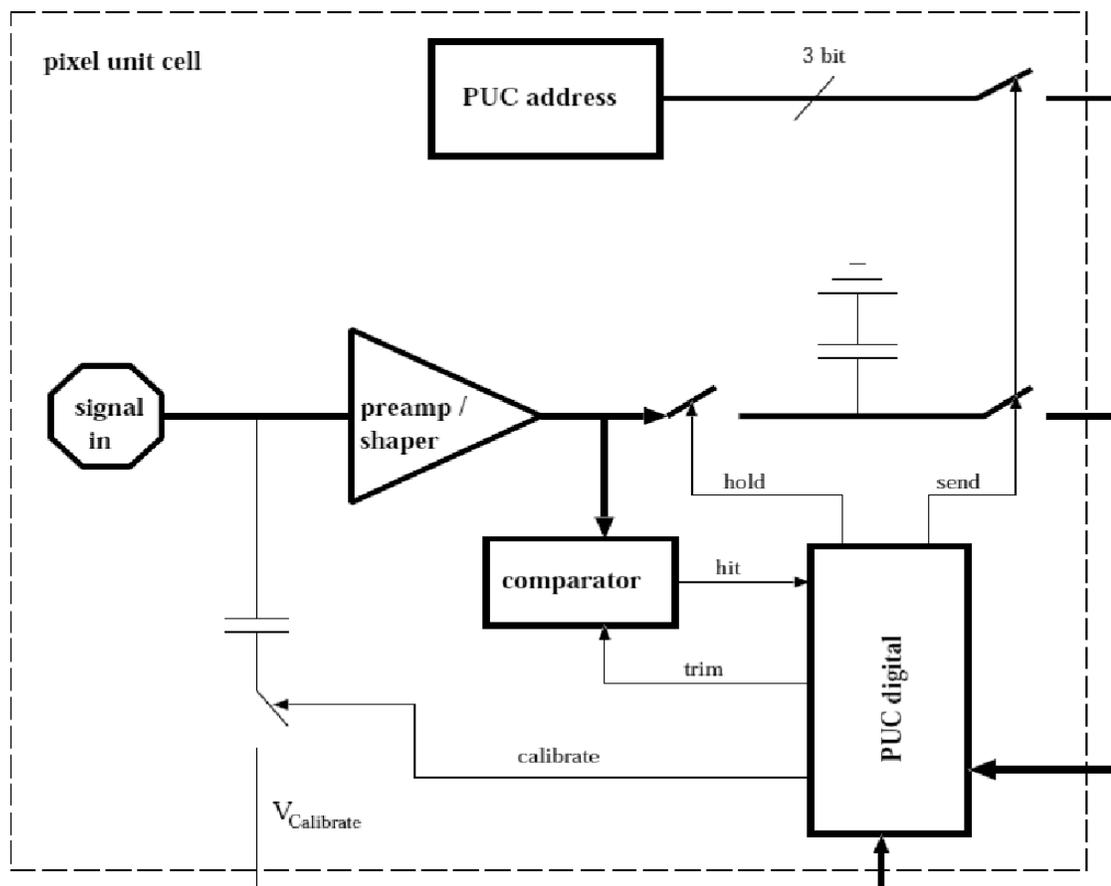


Figura 5-2: Esquema de la electrónica acoplada a cada píxel (*pixel unit cell*) [21].

Cada píxel es leído independientemente por su propia electrónica cada 25 ns, hasta presentar una señal que supere un umbral que puede ser programado. Su

señal es amplificada de forma analógica mediante un circuito que contiene dos amplificadores operacionales. El circuito activa unos interruptores que permiten que la señal sea almacenada en una memoria *Buffer*; que también almacena otros datos relacionados a la señal, como es la dirección del píxel y el elemento de tiempo en el cual fue detectada la señal. Esta secuencia de datos se denomina *hit*. Una vez almacenado el dato, el píxel queda disponible para tomar otra medida. La ventaja de este diseño está en que el píxel funciona automática y autónomamente para leer *hits* de forma rápida.

### 5.1.2. Electrónica en la periferia de la doble columna

Cada doble columna consiste en un arreglo de 160 píxeles conectados a una cadena de lectura común. La doble columna posee la memoria encargada de almacenar las señales provenientes de los píxeles. Cuenta con 32 memorias *Buffer* para los píxeles y 16 memorias *Buffer* para guardar el dato de tiempo en el cual se declaró el *hit*. Los datos llegan secuencialmente a las memorias y son almacenados en ellas por un tiempo máximo de  $3,2\mu s$ .

### 5.1.3. Señal analógica

El protocolo de lectura utilizado por el módulo es un protocolo poco convencional que es una mezcla de datos digitales en base 6 y una señal analógica. La forma de la señal permite conocer utilizando únicamente una línea de transmisión la magnitud de la señal y el origen de la misma, pues lleva la dirección de cada píxel. La forma de la señal se muestra en la figura 5-3. La señal consiste en 6 ciclos de reloj, donde los primeros 5 ciclos están destinados a dar información de la dirección del píxel. Solo uno de estos ciclos de reloj contiene información de la cantidad de

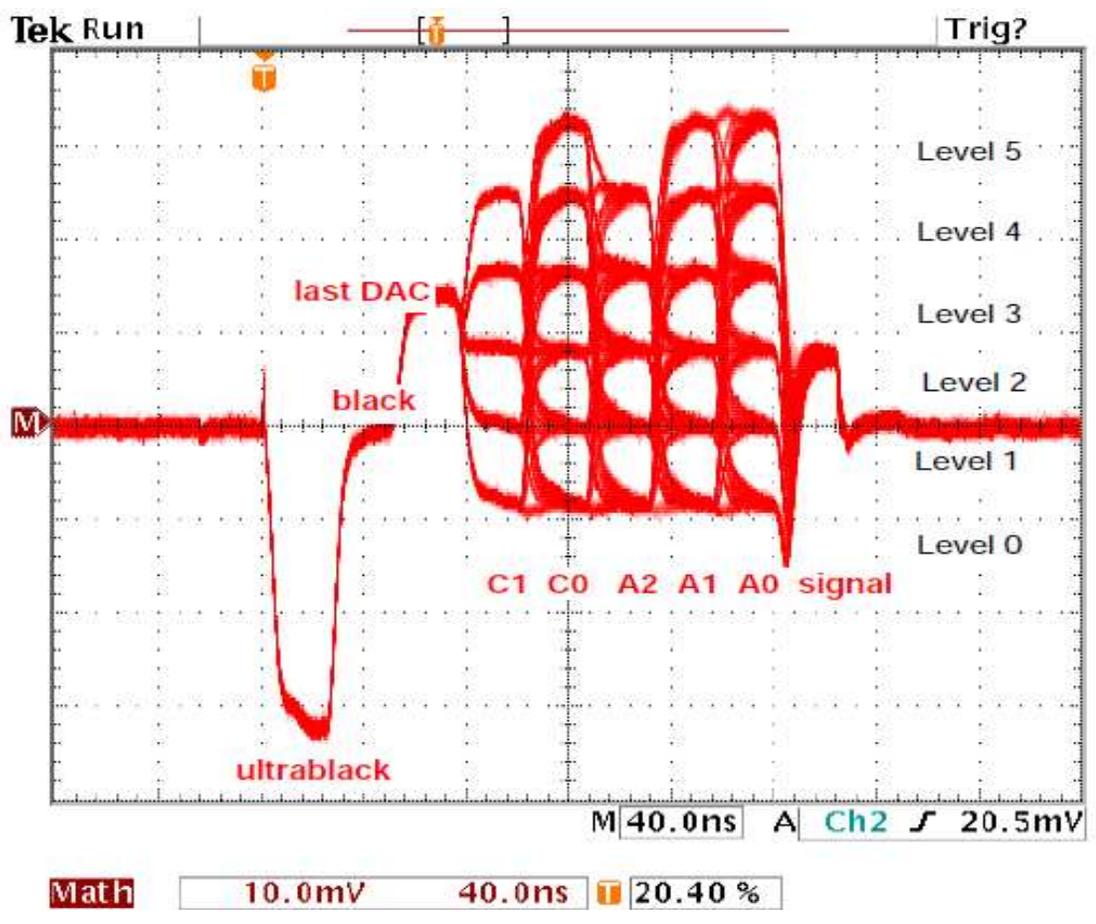


Figura 5-3: Señal analógica [20].

carga medida en el píxel. La magnitud de la señal en este ciclo es llamado *Pulse Height*.

Los 5 ciclos de reloj que contienen la dirección del píxel leído están codificados usando números en base 6, correspondientes a 6 niveles de voltaje, los cuales describen la dirección de la columna y la fila leída.

## 5.2. Parámetros de configuración DAC

Existe una serie de componentes electrónicos que permiten modificar el comportamiento del circuito acoplado a cada píxel con el fin de realizar variedad de ajustes que permitan adaptar el funcionamiento del circuito a diferentes condiciones de trabajo. Los cambios en las condiciones de trabajo pueden ser cambios de temperatura, variaciones entre píxeles o efectos degenerativos producidos por la radiación sobre el silicio.

La forma de realizar estos ajustes sobre el circuito es por medio de conversores de señal digital a analógica (DAC). La ubicación de éstos se puede observar en la figura 5-4. Estos elementos han de recibir una señal en forma digital y tienen como salida una diferencia de potencial proporcional al número recibido. No todos los DAC afectan la forma de la señal, motivo por el cual algunos son más relevantes que otros.

### 5.2.1. Descripción de los principales parámetros DAC

Existe un total de 26 DACs que se pueden programar, algunos de los cuales son configurables de forma individual para cada píxel. La mayoría de estos se fija para el conjunto total del ROC; es decir 4160 píxeles compartirán el mismo parámetro. Algunos parámetros tienen una fuerte relación con otros y deben configurarse en forma conjunta.

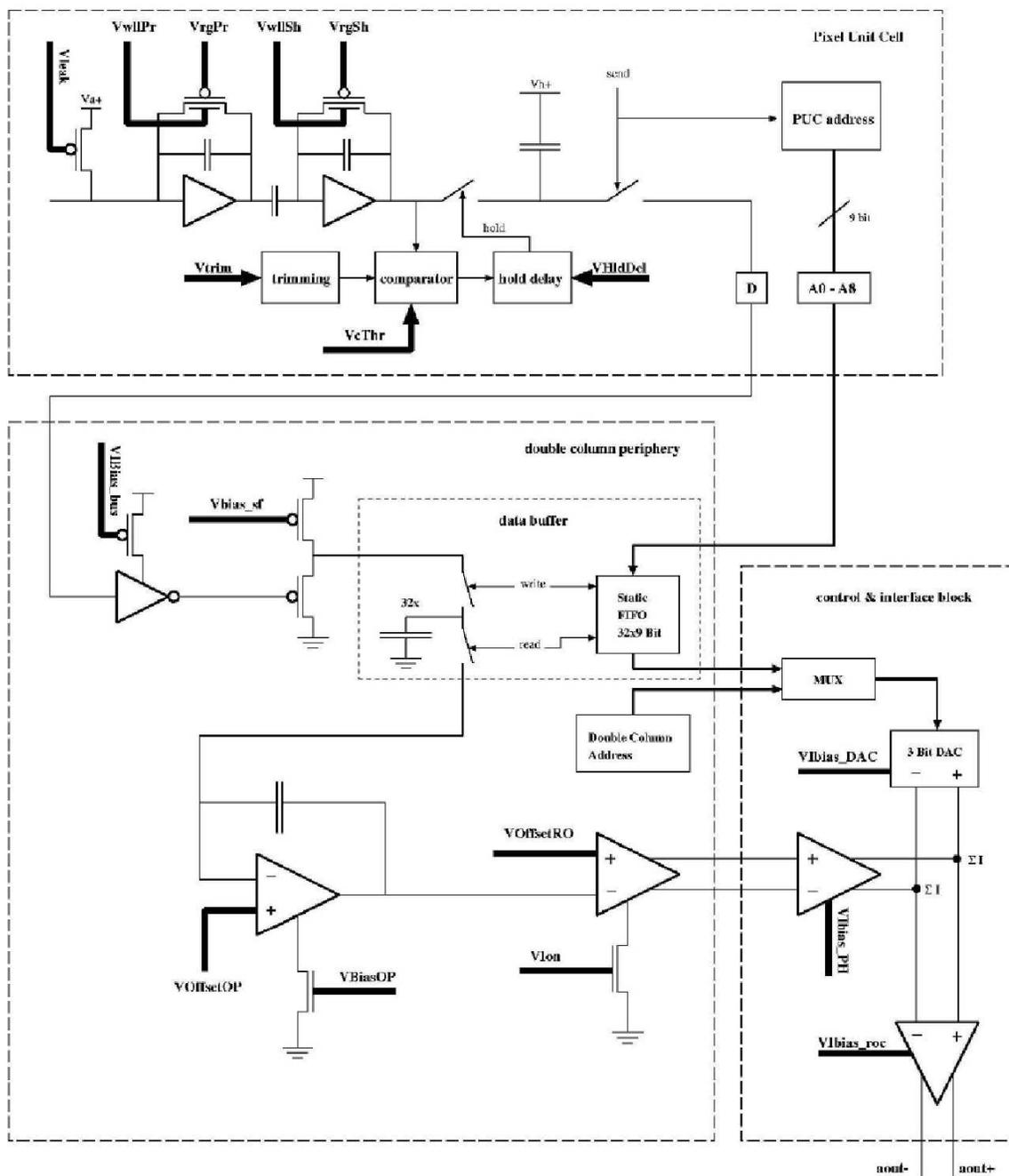


Figura 5-4: Diagrama de bloques PSI46. [20].

### **Voltaje de Calibración $V_{Cal}$**

Este DAC tiene una función muy diferente a los otros parámetros ya que no afecta el comportamiento del circuito. Es utilizado para simular el efecto de generación de carga dentro del silicio, cargando el condensador acoplado a cada píxel. El principal propósito de este DAC es usarlo como referencia para encontrar cambios en el comportamiento de los píxeles o para verificar el correcto funcionamiento de la electrónica acoplada.

### **Tiempo de retardo del $V_{cal}$ $CalDel$**

Cada píxel tiene una capacitancia acoplada que difiere ligeramente de los otros píxeles. Cuando se aplica voltaje, el condensador tarda un tiempo en alcanzar el valor de carga deseado. Cuando se estimula el circuito con  $V_{cal}$ , el proceso de almacenamiento de los datos se hace automáticamente pero se debe esperar un tiempo antes de hacer la lectura para darle tiempo a que el condensador se cargue. Este retraso en la lectura es controlado por el DAC llamado  $CalDel$  el cual resulta importante para el proceso de cualificación de cada módulo.

### **Voltaje umbral $V_{Threshold}$**

Como su nombre lo indica, fija el límite mínimo de señal para declarar un *hit*. Está fuertemente relacionado con el parámetro  $CalDel$ , razón por la cual estos dos parámetros siempre son ajustados de forma conjunta. El punto óptimo para este parámetro depende de los niveles de ruido dentro del sensor y de la temperatura. Este parámetro es fijado para todo el conjunto del ROC.

### **Voltaje de ajuste fino $VTrim$**

Lo ideal es que todos los píxeles tengan exactamente el mismo umbral. Debido a pequeñas diferencias entre los circuitos de píxeles individuales, no se consigue este ideal aplicando sólo el valor de  $VThreshold$  que es común a todos los píxeles. Es necesario usar dos parámetros más llamados  $VTrim$  y  $Trimbits$ . El umbral es determinado de forma gruesa por  $Vthreshold$  mientras  $VTrim$  y  $Trimbits$  se usan para hacer un ajuste fino píxel por píxel para lograr el mismo umbral para todos los píxeles.

## Capítulo 6

# CUALIFICACIÓN DE MÓDULOS DEL DETECTOR DE PÍXELES

Cada módulo contiene 66560 píxeles distribuidos en arreglos de 4160 píxeles acoplados a un *ROC*, con 16 *ROCs* por cada módulo. Cada uno de estos *ROCs* puede ser programado de forma independiente para acondicionar la señal de los píxeles. Ciertos ajustes pueden realizarse con el propósito de que el circuito acoplado a cada píxel y el mismo píxel se encuentren en un punto óptimo de trabajo.

### 6.1. Ajustes de optimización del módulo

El procedimiento para optimizar el módulo consiste en una serie de pruebas de funcionalidad y ajustes de sus parámetros. Esto permite fijar los valores correctos de los DAC para que el módulo sea operacional. Las pruebas más importantes se enumeran a continuación.

#### 6.1.1. Ajuste del DAC *CalDel*

La variación del DAC *CalDel* ajusta el tiempo en que la carga es inyectada a cada *ROC*, para que esté sincronizada con la lectura de los píxeles. El DAC *VThreshold* hace parte del mecanismo para fijar el umbral mínimo que debe superar la señal para ser considerada un dato válido. Este valor permite filtrar buena parte del ruido producido por excitación térmica y otros factores asociados a la electrónica de cada módulo.

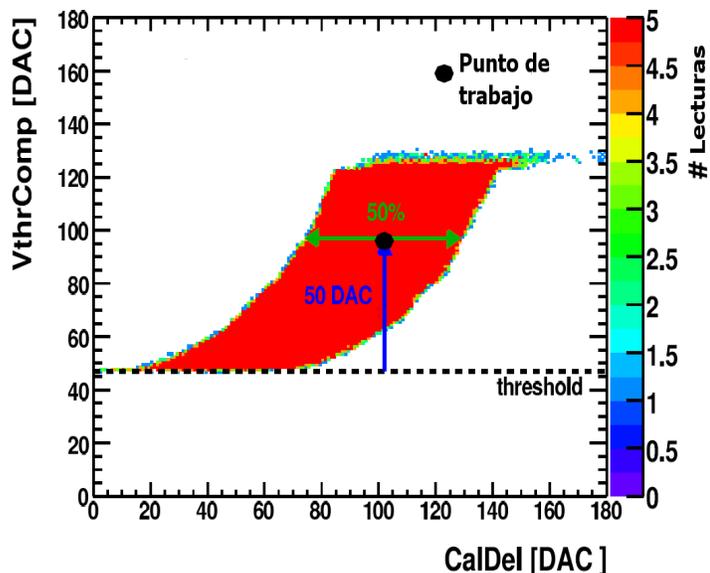


Figura 6–1: VThreshold (voltaje umbral) Vs CalDel.

El procedimiento consiste en variar los DAC  $CalDel$  y  $VThreshold$  en el ROC. Para cada pareja de valores de los DAC se inyecta carga al píxel y posteriormente es leído. La inyección de carga y posterior lectura se hace en 5 ocasiones. La figura 6–1 muestra el resultado de la prueba. El color blanco en la gráfica corresponde a las zonas en las cuales el píxel no tiene ninguna respuesta y las zonas rojas muestran la región donde el píxel fue leído exitosamente 5 veces. El punto óptimo de operación corresponde al punto negro ubicado en el centro de la gráfica.

La prueba es realizada sobre un píxel en cada ROC. Estudios anteriores mostraron que no existen grandes diferencias entre píxeles de un mismo ROC en esta prueba [22], razón por la cual escoger un píxel funcional es suficiente. La pareja de valores óptimos para el píxel son fijados para todo el ROC.

### 6.1.2. Prueba *Trimbit*

La prueba *Trimbit* ajusta el umbral de cada píxel en forma individual. Esto compensa las diferencias entre píxeles que tienen diferentes valores de capacitancia acoplada.

El umbral en un píxel es determinado por la acción combinada de tres parámetros,  $V_{threshold}$ ,  $V_{Trim}$  y  $Trimbit$ . Los primeros dos tienen el mismo valor para todos los píxeles en el ROC.  $Trimbit$  es el parámetro que hace el ajuste fino individualmente para cada píxel pero trabaja en combinación con  $V_{Trim}$  para ajustar el valor base establecido por  $V_{threshold}$ .

Este procedimiento hace posible fijar un mismo umbral para los píxeles y corregir diferencias entre los mismos [3].

### 6.1.3. Calibración de la señal de salida *Pulse height*

Esta calibración es muy importante para la toma de datos, ya que ajusta la forma en que realmente se mide la señal y su significado. Es la graduación que da significado físico a la magnitud del *Pulse height*. Consiste en dos partes explicadas a continuación.

#### Medidas de la magnitud de la señal de salida

Una vez optimizado el módulo, se deposita carga de prueba en cada píxel cuya magnitud es controlada por el DAC  $V_{cal}$ . Este valor es representado por un número digital de 8 bits.

Para cada uno de estos valores se mide el valor de salida (*Pulse height*) y se guarda este valor en un archivo junto con la magnitud del DAC  $V_{cal}$  fijado. Posteriormente se incrementa el valor del DAC  $V_{cal}$  y se repite el procedimiento. El resultado para un píxel típico se muestra en la figura 6-2.

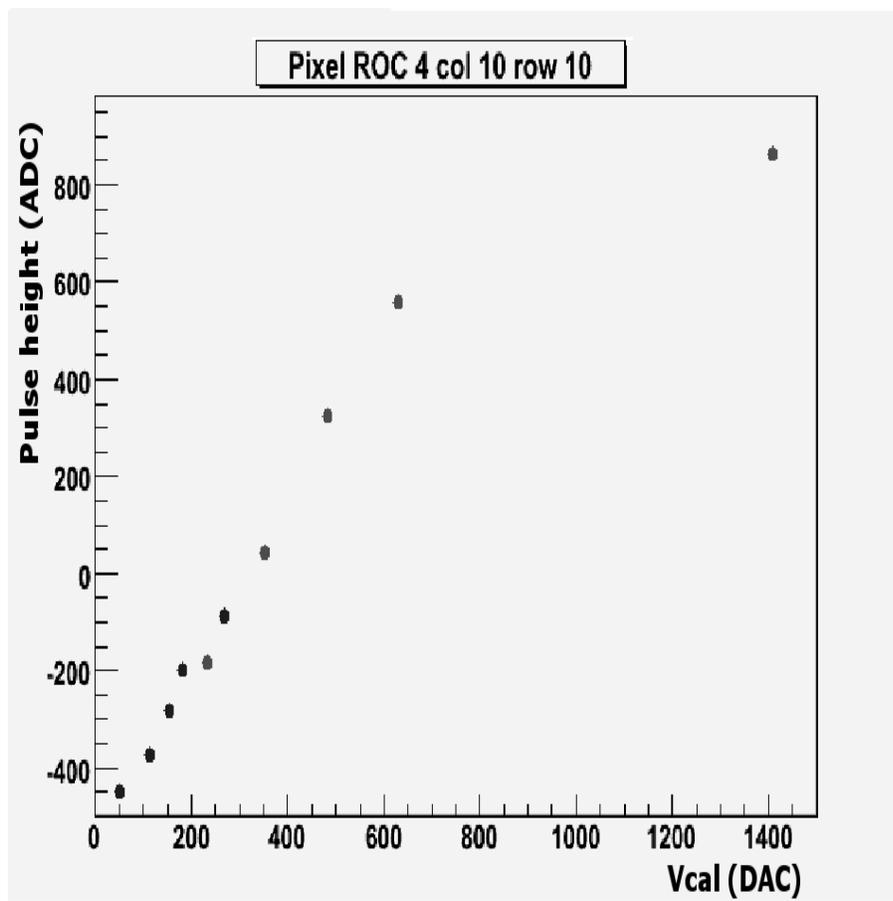


Figura 6-2: Ejemplo de medida para un píxel típico.

### Ajuste a una función hiperbólica

La otra parte de la prueba se encarga de ajustar la tendencia de los datos a una función matemática. La función hiperbólica usada para el ajuste se muestra en la ecuación 6.1.

$$ph(Vcal) = P_3 + P_2 \text{TanH}(P_0 \cdot Vcal + P_1) \quad (6.1)$$

La ecuación se ajusta a los datos como muestra la figura 6-3.

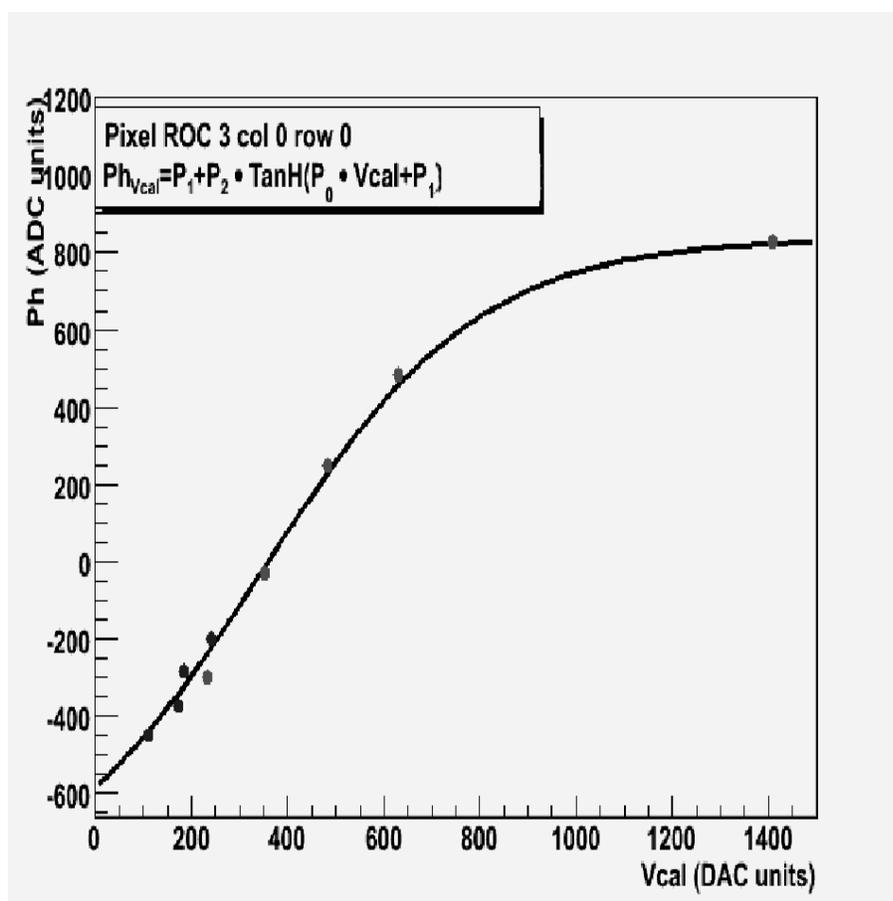


Figura 6-3: Ejemplo de ajuste para un píxel típico.

#### 6.1.4. Relación entre *VCal* y *Pulse height*

Cuando está en uso el LHC, gran cantidad de partículas cargadas inciden sobre el CMS, la señal que produce el píxel y la señal que se lee es el *Pulse height*. Para interpretar esa señal correctamente, queremos usar el valor de *Pulse height* para calcular la carga que se depositó en el píxel. Este cálculo se hace en dos pasos. A la magnitud del *Pulse height* se le asocia un valor de *Vcal* calculado con la función inversa de la ecuación 6.1. El valor medido de *Pulse height* es traducido a unidades de *Vcal*. Luego el valor de *Vcal* es traducido a unidades de carga (número de pares electrón-hueco) en base a una calibración que se ha hecho previamente usando una fuente de rayos X. Los detalles de esta calibración se presentarán en el capítulo 7.

#### 6.2. Adquisición de datos con la tarjeta de pruebas PSI46

El proceso de cualificación tiene como fin configurar los módulos para realizar toma de datos en forma óptima. Las pruebas de cualificación se pueden dividir en dos grupos mayores: (1) aquellas que se hacen inyectando carga al circuito del píxel usando el DAC *Vcal* y (2) aquellas que se hacen utilizando fuentes radioactivas. En ambos casos se utiliza la tarjeta PSI46 para leer las señales generadas en los píxeles. En el primer tipo de prueba el proceso de inyección automáticamente hace que comience el proceso de lectura. En el segundo tipo de prueba, la lectura es comenzada por una señal de *trigger* generada por el programa de prueba de forma aleatoria.

La información proveniente de los píxeles es guardada en un archivo independiente en formato *ROOT*. El archivo contiene la información ordenada en una estructura propia del formato llamada árbol. Cada entrada es llamada *event* y corresponde a una señal de *trigger* en la cual se leen los píxeles activos en ese momento. Esta estructura contiene información ordenada en diferentes tipos de ítem llamados ramas, cuya descripción es la siguiente:

**event:** Es el número de evento en el cual fue leído el dato correspondiente al píxel.

**col:** Dirección de la columna del píxel que contiene un *hit*.

**row:** Dirección de la fila del píxel que contiene un *hit*.

**roc:** Número de *ROC* del píxel que contiene un *hit*.

**Pulse height** Magnitud de la señal analógica en unidades *ADC* de 12 bits.

**Vcal** Equivalencia de la magnitud del *Pulse height* en unidades de *Vcal*.

**cluster:** Número de grupos de píxeles contiguos activados. Se considera que estos grupos son formados cuando una partícula activa varios píxeles.

### 6.2.1. Tamaño de los *Cluster*

El software posee algoritmos para determinar cuántos píxeles activos hay en un *event* y cuántos son píxeles contiguos. Un grupo de píxeles contiguos con señal es denominado *Cluster*. Es decir corresponde a la señal de una partícula que es compartida por un grupo de píxeles. La figura 6-4 muestra la distribución típica del tamaño de los *Cluster* para una medida de 40 minutos de una fuente de rayos X correspondiente a bario.

La disposición en la cual se tomaron datos para esta medida hace que la mayoría de las partículas incidan de forma perpendicular. Esta es la razón de que la mayoría de los *Cluster* son de tamaño 1.

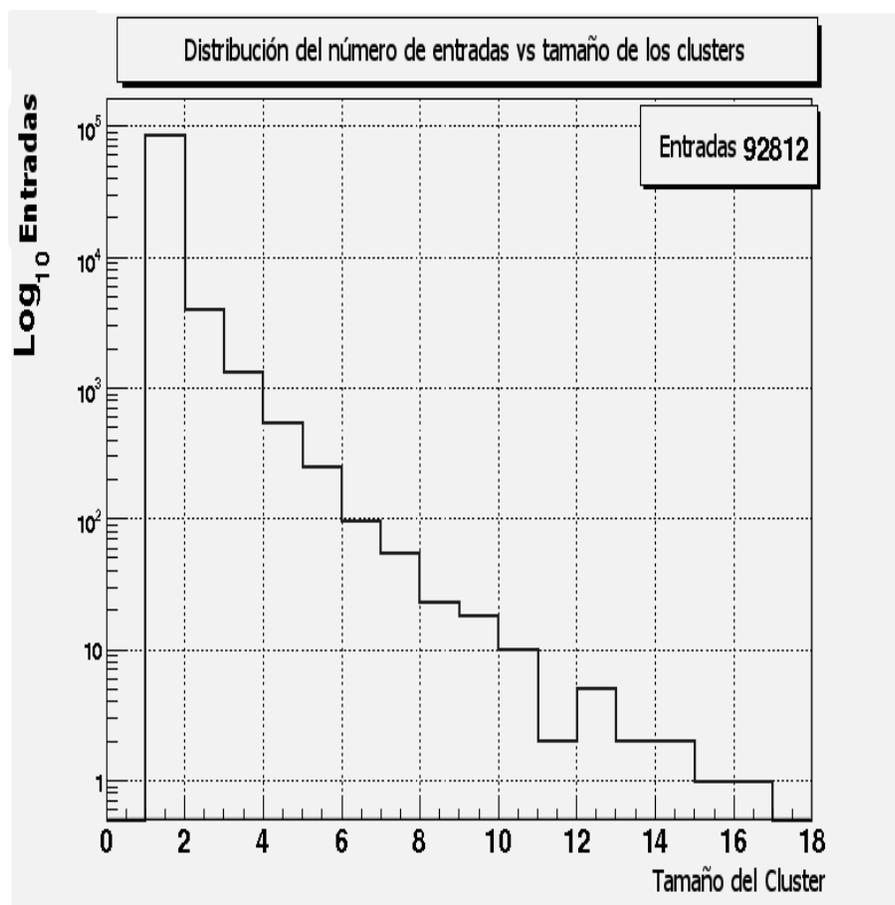


Figura 6–4: Distribución típica del número de *Cluster* Vs tamaño. Se puede observar que más del 94% corresponde a *Cluster* con tamaño 1.

## Capítulo 7

# PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN DEL PARÁMETRO $V_{cal}$ ENTRE PÍXELES

El parámetro  $V_{cal}$  permite depositar carga en el condensador acoplado a un píxel o a todos los condensadores de todos los píxeles de un mismo  $ROC$ . La cantidad de carga es controlada por el valor de  $V_{cal}$  que es interpretado por un conversor digital a analógico  $DAC$ . A priori no se conoce la equivalencia de una unidad de  $V_{cal}$  en términos físicos, o sea, en términos de una unidad de carga. Se necesita hacer una calibración para determinar esa equivalencia.

Este parámetro es utilizado con el fin de calibrar la respuesta de los circuitos acoplados. Se puede comparar con una señal real producida en el píxel usando fuentes de rayos X con energía conocida. Utilizando ese procedimiento se puede determinar la equivalencia de una señal de  $V_{cal}$  al compararla con señales reales. El procedimiento había sido realizado sobre todos los módulos que actualmente constituyen el detector de píxeles [23]. Estos estudios proporcionaron información sobre el comportamiento promedio de todos los canales en un  $ROCs$ , sin considerar las diferencias en el comportamiento entre diferentes píxeles.

Uno de los proyectos documentados en esta tesis tenía como meta estudiar estas diferencias entre píxeles pertenecientes a un mismo sensor. Para cumplir con este fin, se desarrolló un procedimiento experimental que será explicado a lo largo del presente capítulo.

### 7.1. Montaje Experimental

Las medidas presentadas en este trabajo fueron realizadas en las instalaciones del laboratorio *Paul Scherrer Institut* ubicado en Villigen, Suiza. Los elementos utilizados, que serán descritos a continuación, son instrumentos dedicados para realizar pruebas de cualificación de los módulos. En la figura 7-1 se puede apreciar una fotografía del montaje experimental utilizado para realizar las medidas.

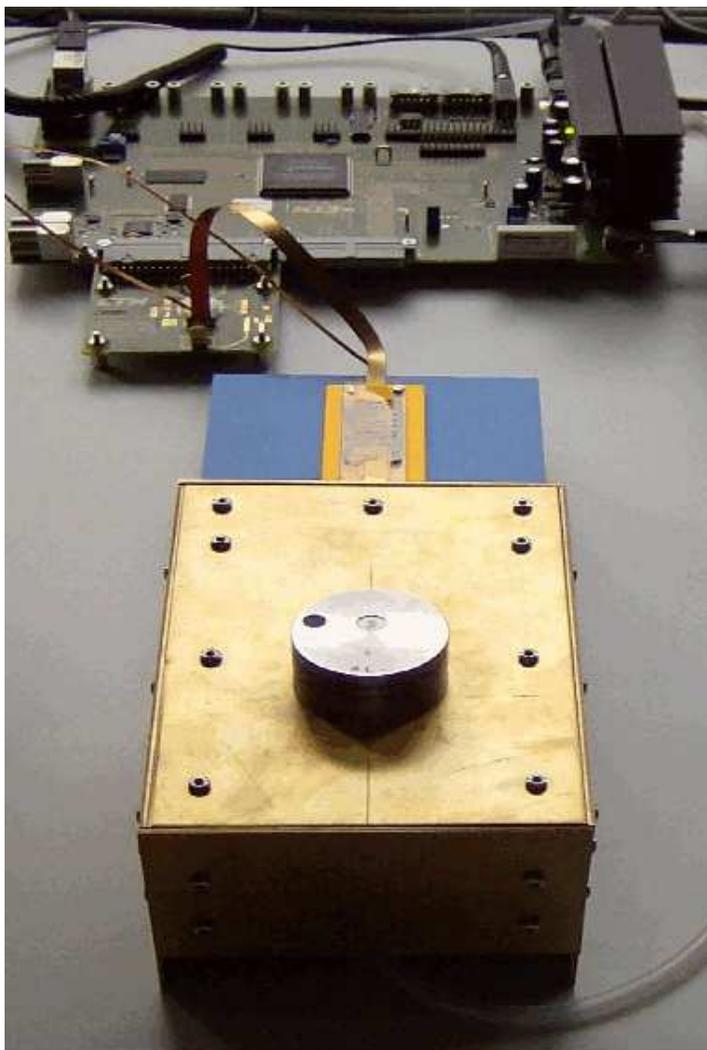


Figura 7-1: Configuración del experimento para la toma de datos.

### 7.1.1. Tarjeta de pruebas *psi46*

Extraer las señales del circuito integrado de lectura *ROC*, requiere seguir cierto protocolo de comunicación (sección 5.1.3). Las pruebas con módulos o *ROCs* individuales necesitan tener un sistema de medida reducido capaz de programar los diferentes *DAC* de control y leer las señales dentro del módulo. Para este propósito el laboratorio PSI ha diseñado una tarjeta de pruebas, mostrada en la figura 7-2.

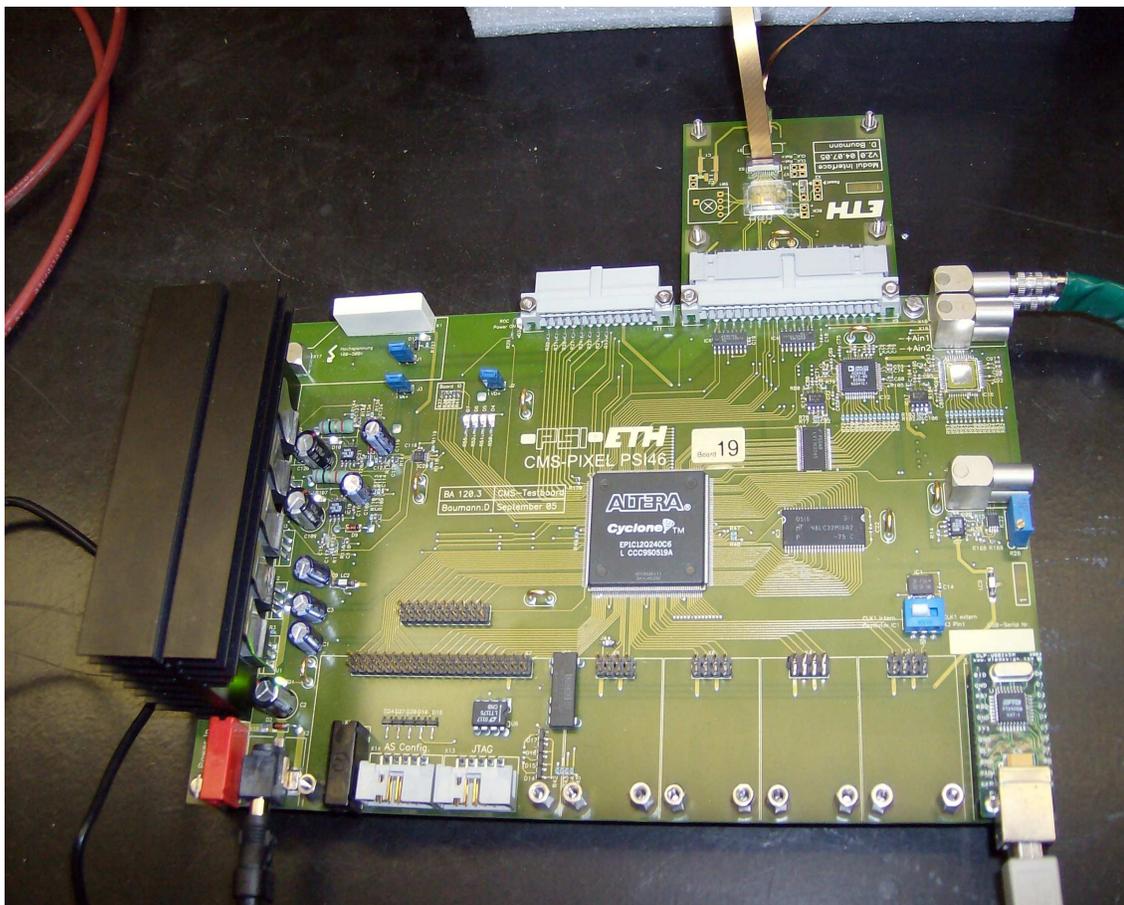


Figura 7-2: Tarjeta de pruebas *psi46*

La tarjeta contiene un dispositivo electrónico denominado *Field Programmable Gate Array (FPGA)* que es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya funcionalidad puede ser programada. La (*FPGA*) cumple la función de

diferentes circuitos electrónicos en un solo dispositivo, con la capacidad de ajustar su comportamiento y función sin necesidad de cambiar ningún componente externo.

La tarjeta de pruebas también cuenta con un conversor analógico digital (*ADC*) que se encarga de transformar la señal enviada por el módulo a números digitales binarios de 12 bits, para decodificar la señal y ser leída por la *FPGA*.

La tarjeta de pruebas se utiliza para enviar señales digitales al módulo y programarlo; además lee los datos de forma digital proporcionados por el conversor analógico digital y los reenvía usando el puerto USB al computador donde se tiene el software de control y adquisición.

### 7.1.2. Módulo M590

El módulo utilizado es una muestra de los módulos producidos para el detector de píxeles, al cual se le realizaron pruebas de cualificación para comprobar su funcionalidad.

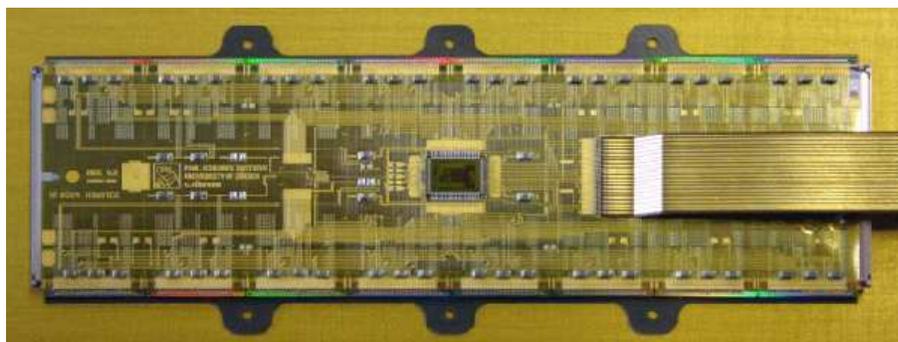


Figura 7-3: Módulo de prueba

### 7.1.3. Fuente radioactiva Am 241

La fuente de fotones escogida consiste en una fuente radioactiva Am 241 que produce rayos  $\gamma$  con energías de 59.537 keV, las cuales excitan los electrones internos de uno de los blancos metálicos (Ba, Mo o Ag). La interacción de los rayos  $\gamma$  con los electrones más internos produce un cambio en la configuración electrónica de los

átomos del metal, que posteriormente regresan a su estado inicial liberando energía en forma de fotones. Los rayos X son producidos cuando los electrones regresan a las capas más internas de los átomos, llamadas capas K como muestra la figura 7-4.

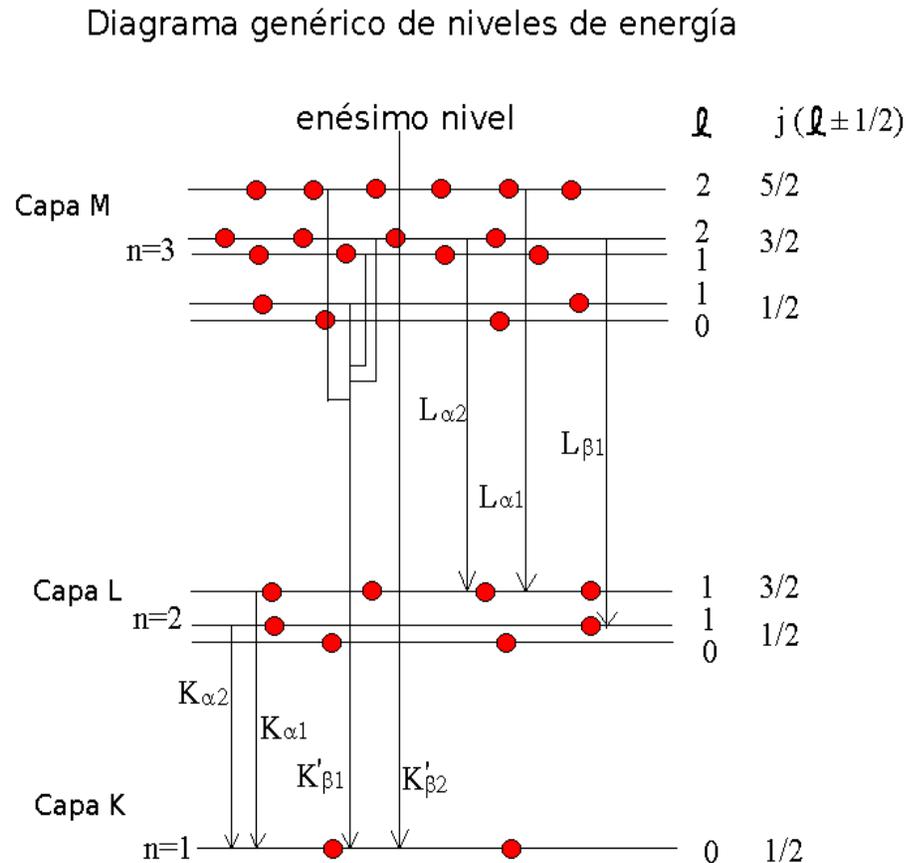


Figura 7-4: Diagrama de niveles de energía accesibles por los electrones en un átomo. Al incrementar  $n$  se incrementa la energía. La separación de niveles no está a escala [14].

El espectro de emisión depende de la configuración electrónica de cada elemento. Los espectros de energía emitida tienen picos bien diferenciados correspondientes a una transición entre niveles. En el caso de la fuente utilizada los picos principales de emisión corresponden a la transición entre la capa L y K, denominados  $K_{\alpha}$ , como puede verse en la figura 7-4. Cada blanco se puede alternar manualmente para

obtener un espectro de emisión diferente. La superposición de los espectros para las fuentes utilizadas puede verse en la figura 7-5.

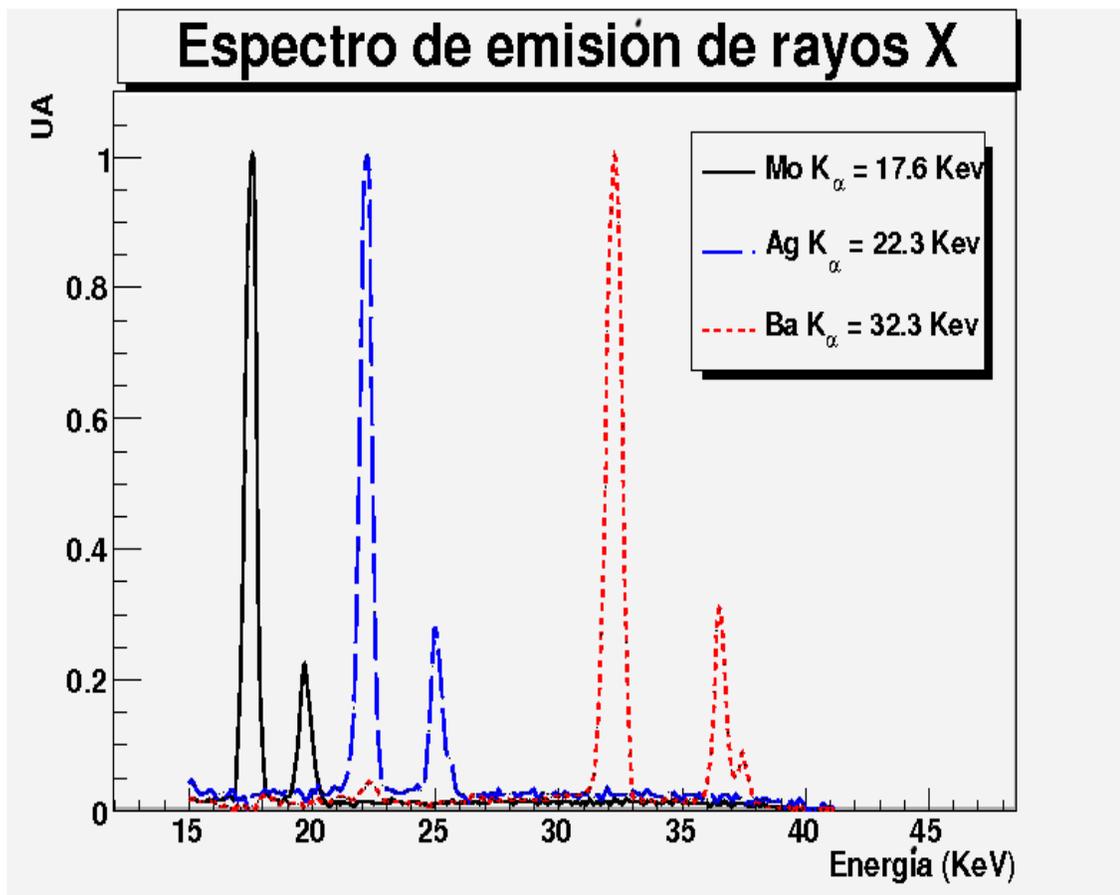


Figura 7-5: Espectro de emisión de los blancos de la fuente de X Am241 [24]

Es de particular interés para propósitos de calibración trabajar con fotones de rayos X, ya que la cantidad de pares electrón-hueco generados se producen de forma proporcional a la energía del fotón, proceso explicado en la sección 4.1.1.

## 7.2. Software utilizado

El software utilizado es una colección de clases escritas en *C++* y *ROOT*, para el manejo y representación gráfica de los datos. El software permite la programación

de los diferentes *DAC* en cada *ROC*, así como realizar ajustes automáticamente para optimizar algunos de ellos. También interpreta y decodifica los datos recibidos para poder visualizar los resultados de las diferentes calibraciones.

### 7.2.1. Paquete *psi46expert*

El paquete *psi46expert* es una colección de clases dedicadas al desarrollo de pruebas del *ROC*. Permiten tanto la visualización como el almacenamiento de los datos en formato *ROOT*, para ser analizados de forma independiente usando funciones o programas escritos por el usuario. Parte de estas librerías contienen funciones que permiten modificar los parámetros internos del *ROC* o de la Tarjeta de pruebas, permitiendo así controlar el comportamiento del *ROC* en diferentes tipos de pruebas.

### 7.2.2. Software adicional escrito para este trabajo

Los datos son guardados en formato *ROOT* y es necesario diseñar algunos *scripts* que permitan visualizar y analizar los datos de forma más completa. Parte de este trabajo consistió en la escritura de *scripts* para la visualización de los datos tomados con las fuentes radioactivas, la decodificación de las direcciones de los píxeles y la construcción de mapas de entradas.

La construcción de las curvas tomando píxeles individuales utilizando la información de los mapas, el análisis y filtrado de los datos así como la construcción de histogramas y el ajuste a funciones matemáticas se hicieron mediante programas independientes escritos como parte del desarrollo de este trabajo.

### 7.3. Procedimiento Experimental

#### 7.3.1. Toma de datos

Una vez optimizado el módulo con el procedimiento descrito en el capítulo 6, se puede iniciar la toma de datos. Esta consiste en colocar la fuente de rayos X de forma fija sobre el módulo a una distancia aproximada de 2 cm, para que ilumine uniformemente los *ROCs* de interés. Un diagrama del montaje se puede ver en la figura 7-6.

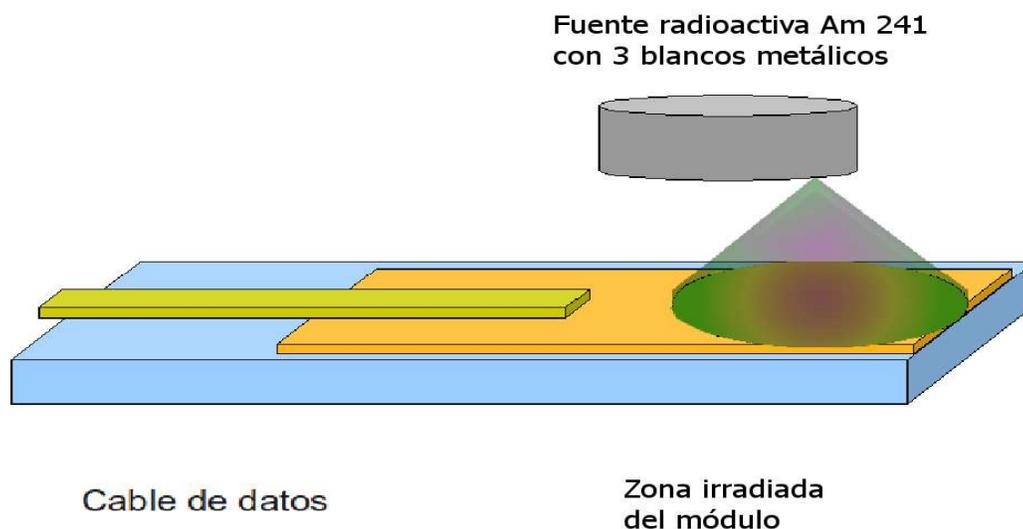


Figura 7-6: Configuración del experimento para la toma de datos

El *ROC* está programado para que almacene datos durante un tiempo y los envíe sincronizadamente usando una señal de disparo denominada *Trigger*. Esta señal en el detector real se activa externamente, pero en este experimento se tomaron datos utilizando un *trigger* aleatorio que sincroniza la lectura del módulo. Cada muestreo habilita a los píxeles para que acumulen datos nuevamente. En promedio un píxel recibe 1 entrada cada 2 minutos, lo que hace que la probabilidad de que dos fotones incidan sobre el mismo píxel en el intervalo de tiempo de lectura, que es de apenas 25 ns, sea muy baja.

### 7.3.2. Determinación de equivalencia del parámetro $V_{cal}$

El método utilizado para calibrar las unidades de  $V_{cal}$  se basa en la variación del DAC  $V_{Threshold}$ , que es el umbral de energía mínima para considerar la señal como un *hit*. En el caso ideal utilizando valores de umbral altos, no deberían aparecer *hits*, pues la energía de la señal es muy baja para ser considerada. Al reducir gradualmente el umbral, en el punto exacto que la magnitud de la señal exceda el umbral aparecerán *hits* almacenados en el píxel. Si el umbral continúa disminuyendo se supone que todas las señales serán almacenadas y la gráfica debe ser muy aproximada a una función escalón.

El umbral es fijado utilizando el DAC  $V_{Threshold}$ . Para valores altos de  $V_{Threshold}$ , el umbral es en realidad cero y para valores bajos de  $V_{Threshold}$  el umbral corresponde a un valor alto. La función del umbral es monotónicamente decreciente respecto al valor de  $V_{Threshold}$ .

El procedimiento consiste en relacionar la energía conocida del fotón con un valor de  $V_{Threshold}$  que posteriormente puede relacionarse con un valor de  $V_{cal}$ .

Éste puede ser resumido en 4 pasos:

- (1) **Toma de datos:** Para cada valor de  $V_{Threshold}$ , se tomaron datos durante un tiempo aproximado de 45 minutos utilizando un blanco de la fuente de rayos X. Los valores de  $V_{Threshold}$  se incrementaron gradualmente desde 0 hasta 140.
- (2) **Ajuste de datos:** Se construye una gráfica en la cual el eje horizontal corresponde al valor de  $V_{Threshold}$  y el eje vertical corresponde al número de entradas o *hits* en el píxel. Esta gráfica es ajustada a una función descrita por la ecuación 7.1.

$$Hits(V_{threshold}) = P_0 (1 + Erf(P_2 \cdot (V_{threshold} - P_1))) + P_3 \quad (7.1)$$

El parámetro  $P_1$  es el valor de  $V_{Threshold}$  que corresponde al punto medio del número de *hits*. Este valor de  $V_{Threshold}$  corresponde a la magnitud de la energía

pico del espectro de emisión del blanco utilizado. Un ejemplo de ajuste se muestra en la figura 7-7.

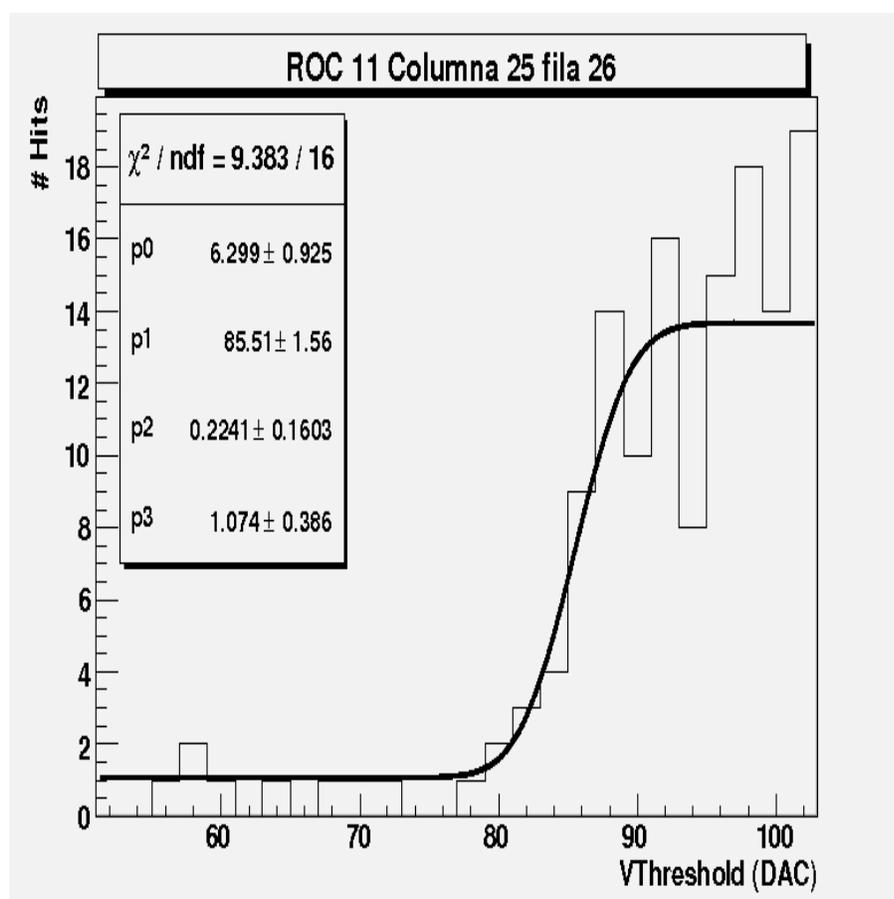


Figura 7-7: Ejemplo de ajuste para un píxel

(3) **Encontrar el Vcal equivalente:** El procedimiento consiste en fijar el valor de  $V_{threshold}$  obtenido y realizar una rampa de  $V_{Cal}$ . Por cada variación de  $V_{Cal}$  se envían 10 señales, las cuales en caso de tener una magnitud inferior al umbral no serían contadas como un *hit*. A medida que se incrementa el valor de  $V_{Cal}$  empiezan a haber *hits*. A esta gráfica se le realiza el ajuste mostrado en la función 7.2.

$$Hits(Vcal) = P_0 (1 + Erf(P_2 \cdot (Vcal - P_1))) + P_3 \quad (7.2)$$

De esa manera se puede encontrar el valor de  $V_{Cal}$  equivalente al  $V_{threshold}$  extraído en el punto (2).

**(4) Cambiar el blanco:** Se repiten los pasos (1),(2) y (3). Se utilizaron 3 blancos metálicos de la fuente radioactiva: Mo,Ag y Ba. Los blancos presentan picos de emisión  $K_{\alpha}$  a una energía de 17.6 KeV, 22.3 keV y 32.3 KeV respectivamente.

**5) Obtención de la equivalencia de  $V_{cal}$  en electrones:** Se calcula el número de electrones generados en el sensor para cada valor de energía correspondiente a cada blanco. Se utiliza el método explicado en la sección 4.1.1.

Se construye una gráfica de número de electrones contra  $V_{cal}$  obtenido en el paso (3) y se ajusta la relación usando una función lineal. La pendiente de la recta es la equivalencia de una unidad de  $V_{cal}$  en número de electrones.

Este procedimiento se realizó de forma independiente para cada píxel de los *ROCs* más iluminados.

### Duración de prueba

Se realizaron tomas de datos con una duración aproximada de 45 minutos por cada valor de  $V_{Threshold}$ . Cada toma de datos completa tiene entre 25 y 30 variaciones de  $V_{Threshold}$ , por lo cual la prueba tiene aproximadamente una duración de 20 horas. La prueba para cada blanco se realizó en horas de la noche para evitar las altas temperaturas durante el día y de esta forma mantener estable la temperatura del módulo.

La fuente radioactiva fue colocada sobre los *ROCs* ubicados en la parte baja del módulo debido a que esta zona se encuentra libre de cables de conexión y permite una iluminación más uniforme sobre cada *ROC* como se observa en la figura 7–8.

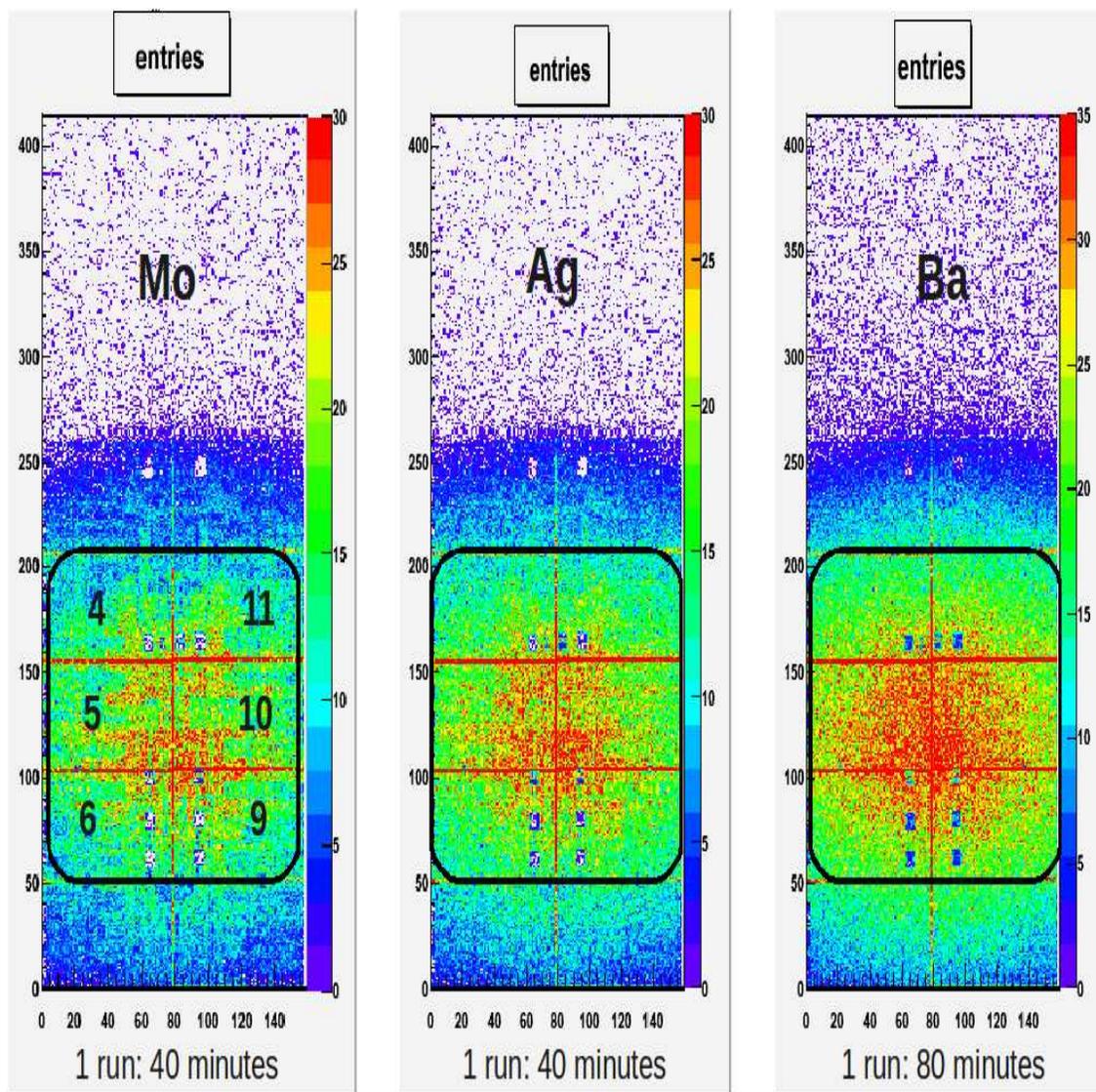


Figura 7-8: Mapa de entradas por cada blanco de la fuente radioactiva

## 7.4. Criterios de calidad

### 7.4.1. Bondad de ajuste en las curvas de respuesta de los píxeles

Cada ajuste realizado a los píxeles explicado en el paso (2) ha sido evaluado utilizando la prueba de  $\chi^2$ . El nivel de significación estadística se encontró utilizando el método de cálculo de probabilidad incompleta de la función Gamma que provee el paquete de software ROOT [25]. Solo se han considerado píxeles cuyo ajuste supere un nivel de significación estadística mayor del 50 %.

### 7.4.2. Parámetros de la función de ajuste

La función de ajuste 7.1 posee tres parámetros que pueden ser utilizados como una medida de la calidad de los datos tomados a un píxel. Así cada parámetro puede interpretarse de forma tal que permite conocer el comportamiento del píxel en cada medida. La función escogida posee un comportamiento que se ajusta al procedimiento experimental adecuadamente. Basado en el comportamiento ideal de un píxel bajo las condiciones experimentales expuestas en el capítulo 7 es posible dar una interpretación física a cada uno de los parámetros usados. A continuación se describen los mismos.

$P_0$  : Es una medida del flujo de fotones incidente sobre cada píxel. La amplitud de la gráfica es dos veces este parámetro.

$P_2$  : Este parámetro está relacionado con el ruido en el circuito. Por definición de la función error se puede expresar este parámetro como muestra la ecuación 7.3.

$$P_2 = \frac{1}{2\pi\sigma} \quad (7.3)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la distribución normal y es una medida de las fluctuaciones debidas al ruido aleatorio.

$P_3$  : Este parámetro está relacionado con el ruido en el píxel. Debe ser pequeño.

Estos parámetros de ajuste pueden verse en la figura 7-7. Para el filtrado utilizando los parámetros anteriores de la función de ajuste se tomó la media de la función y se eliminaron los valores extremos de la distribución de cada *ROC*.

Un ejemplo de las distribuciones de los parámetros para un ROC junto con la distribución considerada se muestra en la figura 7-9. Las distribuciones correspondientes a  $P_0$  y  $P_3$  no son simétricas. Los píxeles demasiado alejados de la tendencia de las distribuciones no fueron considerados.

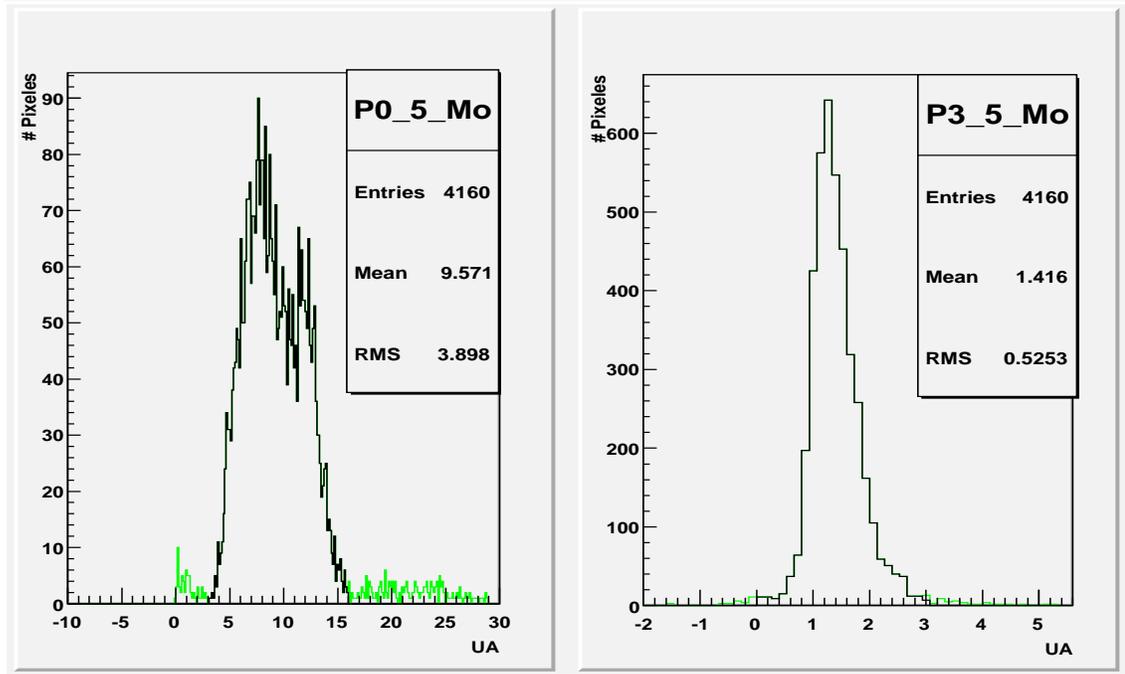


Figura 7-9: Distribuciones de los parámetros obtenidos al realizar el ajuste en el ROC 5. Las distribuciones en verde claro son las distribuciones de los parámetros sin descartar ningún píxel, las distribuciones en negro corresponden a los píxeles utilizados en el análisis.

### 7.4.3. Criterios de calidad en el ajuste lineal

El ajuste lineal relaciona las medidas de  $V_{cal}$  con el número de pares electrón-hueco generados en el sensor (Sección 4.1.1); la pendiente de la recta es la equivalencia de una unidad de  $V_{cal}$  en electrones.

Para medir la calidad del ajuste se realizó la prueba de correlación lineal, donde se aceptaron píxeles con un nivel de correlación mayor del 0,99 para construir las distribuciones.

#### 7.4.4. Píxeles Seleccionados

Solo se seleccionaron píxeles que cumplen con los criterios de calidad establecidos en las secciones anteriores. Por otro lado algunas conexiones y circuitos están ubicados sobre la superficie del sensor y es necesario descartar píxeles ubicados bajo estos elementos. La figura 7-10 muestra los píxeles que superaron los criterios de calidad en el *ROC* 4.

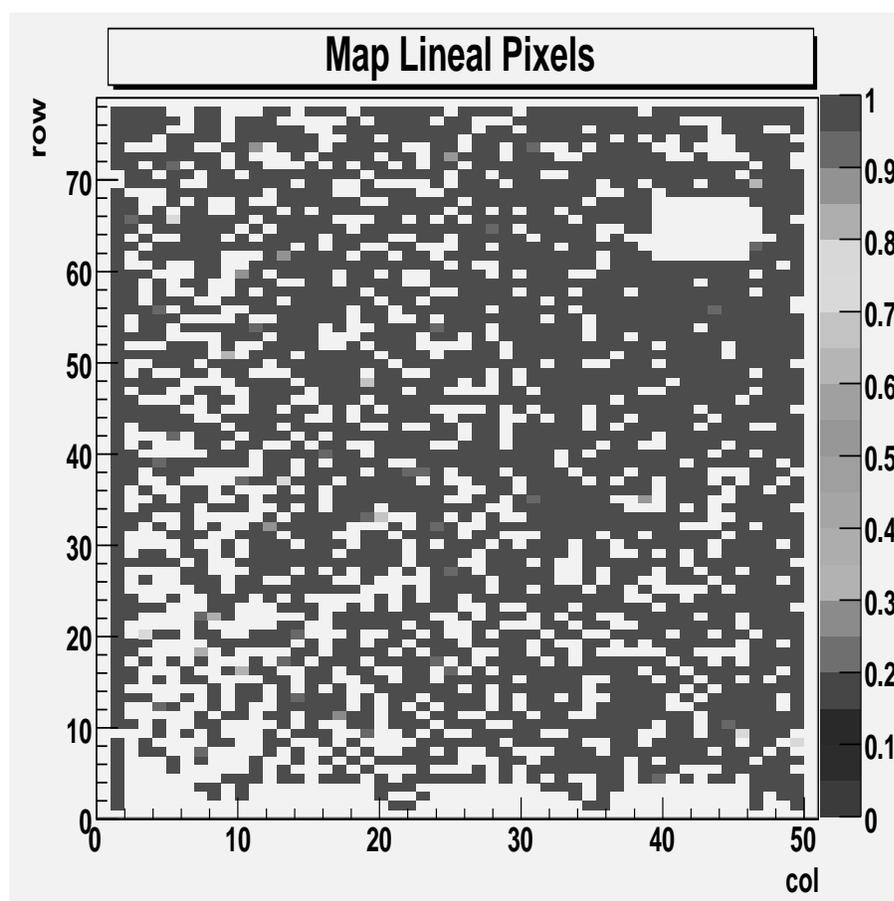


Figura 7-10: Mapa de píxeles que superan los criterios de calidad en el *ROC* 4.

## Capítulo 8

# RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN DEL PARÁMETRO $V_{cal}$ ENTRE PÍXELES

### 8.1. Resultados

Una vez aplicados los criterios de calidad del ajuste, todavía se tiene una muestra suficientemente grande que permite encontrar las características de las distribuciones deseadas; así se garantiza una muestra más uniforme, alejada de posibles factores no inherentes a los píxeles que pueden haber afectado las medidas.

#### 8.1.1. Distribución de los valores de $V_{Threshold}$ equivalente

El parámetro  $P_1$  de la ecuación 7.1 es el  $V_{Threshold}$  correspondiente a la energía pico de cada espectro de emisión de un blanco. Un ejemplo típico de la distribución del parámetro  $P_1$  en un ROC puede verse en la figura 8-1.

Se obtuvieron distribuciones similares en los  $ROC$ s más iluminados. Éstas presentan un pico bien diferenciado y un valor RMS que aumenta con la energía.

#### 8.1.2. Distribución de los valores de $V_{cal}$

Cada píxel fue medido en forma independiente y posee un valor de  $V_{Threshold}$  equivalente que es independiente de los otros píxeles. Cada valor de  $V_{Threshold}$  puede traducirse a un valor de  $V_{cal}$  equivalente; esto permite construir la distribución de valores de  $V_{cal}$  que corresponden a la energía pico de la fuente radioactiva

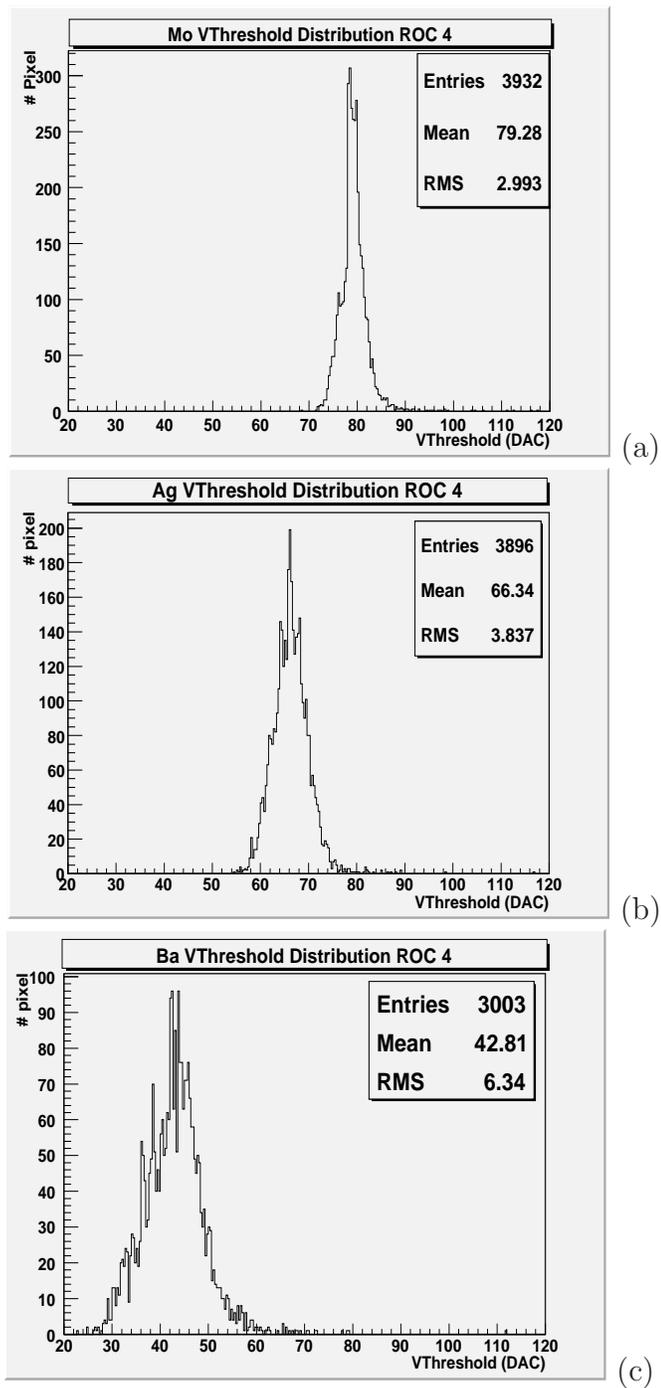


Figura 8-1: Distribuciones de  $VThreshold$  equivalente para el ROC 4, (a) Mo,(b) Ag y (c) Ba

por cada píxel. La figura 8-2 muestra las distribuciones obtenidas para el *ROC* 4, que es típica de los *ROCs* más iluminados.

Estas distribuciones presentan un comportamiento respecto a los anchos de la distribución que depende de la energía. El valor del RMS de las distribuciones aumenta a la par con la energía correspondiente a cada blanco.

### 8.1.3. Relación del ancho de las distribuciones *Vcal* con el valor de *VThreshold*

El sensor tiene un comportamiento que puede explicar la diferencia del RMS entre distribuciones. Para un valor dado de *VThreshold*, cada píxel muestra un valor de *Vcal* diferente, por lo tanto el *Vcal* equivalente en un *ROC* forma una distribución. El ancho de esta distribución respecto al valor de *VThreshold* fijado se muestra en la figura 8-3.

Se observa que el *Vcal* correspondiente para cada *VThreshold* presenta mayores diferencias entre píxeles mientras mayor es la energía. El comportamiento no es lineal ni uniforme. En el caso del *ROC* estudiado, se observa que el RMS para valores de *VThreshold* de 80 y 66, correspondientes a los blancos de molibdeno y plata, el valor es mucho menor que el correspondiente al *VThreshold* 42 asociado al blanco de Bario.

### 8.1.4. Distribución de los valores de pendientes

Cada distribución es dada en forma independiente para cada *ROC*. En promedio el 65 % de los píxeles fueron incluidos dentro de la distribución. El resultado de la distribución para el *ROC* 4 puede verse en la figura 8-4.

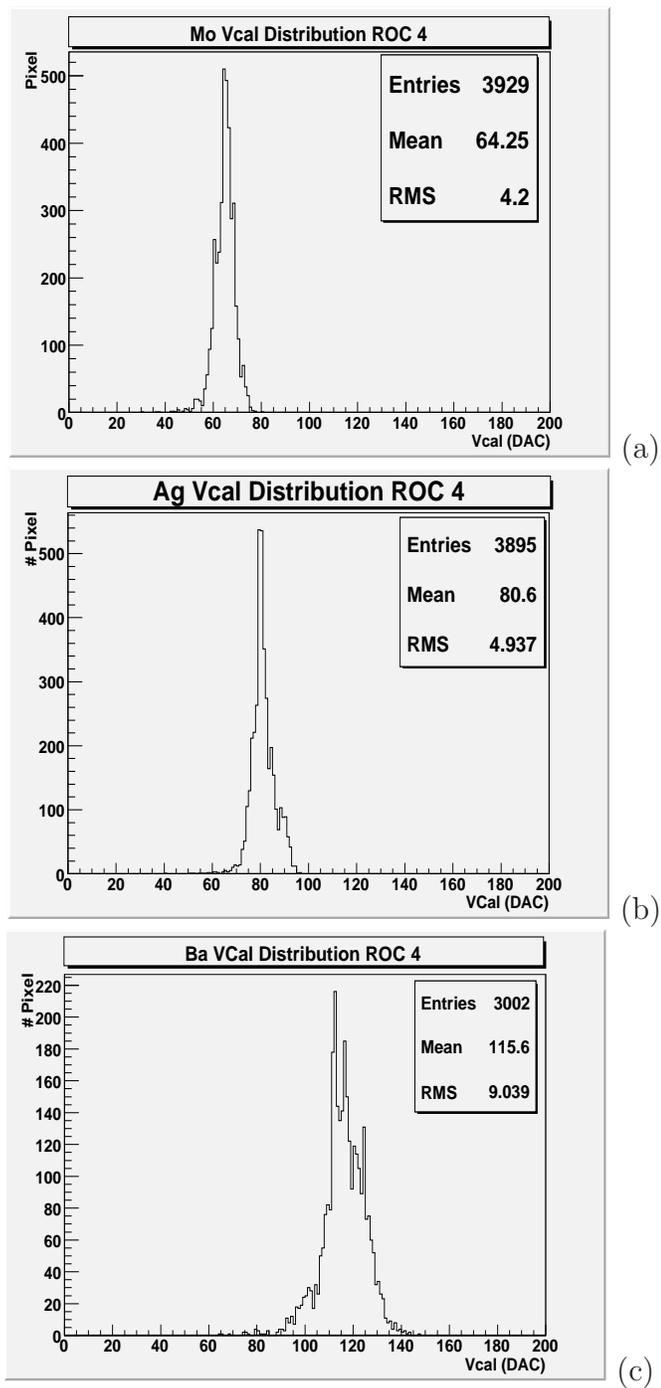


Figura 8-2: Distribuciones de VCal para el ROC 4, (a) Mo, (b) Ag y (c) Ba

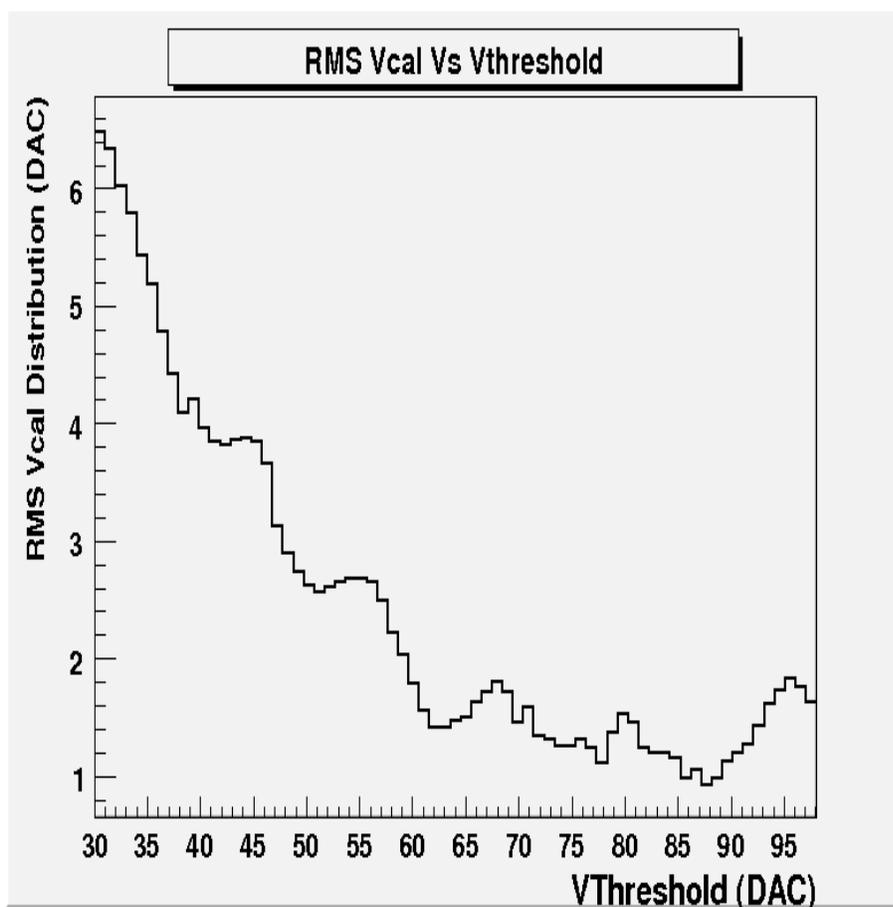


Figura 8-3: La figura muestra como el valor del RMS de las distribuciones de *Vcal* para los píxeles se hace más grande para valores de *VThreshold* bajos.

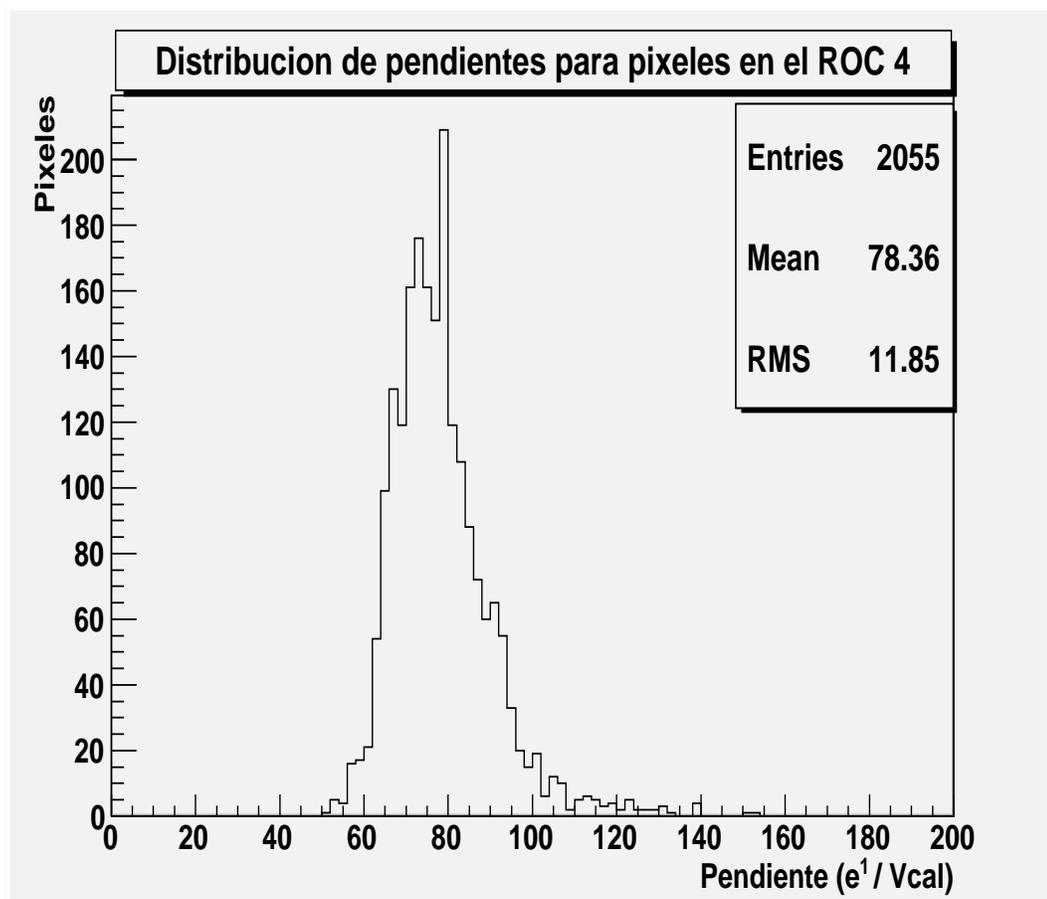


Figura 8-4: Distribución de las pendientes para el *ROC* 4.

### 8.1.5. Distribución de los valores de intercepto

El intercepto es el segundo parámetro obtenido al realizar el ajuste lineal. La figura 8-5 muestra la distribución típica obtenida en un ROC. Utilizando los parámetros de la pendiente y el intercepto, se calcula la distribución de la magnitud de la señal en electrones al inyectar carga con un valor de  $V_{Cal}$  60. El resultado es mostrado en la figura 8-6.

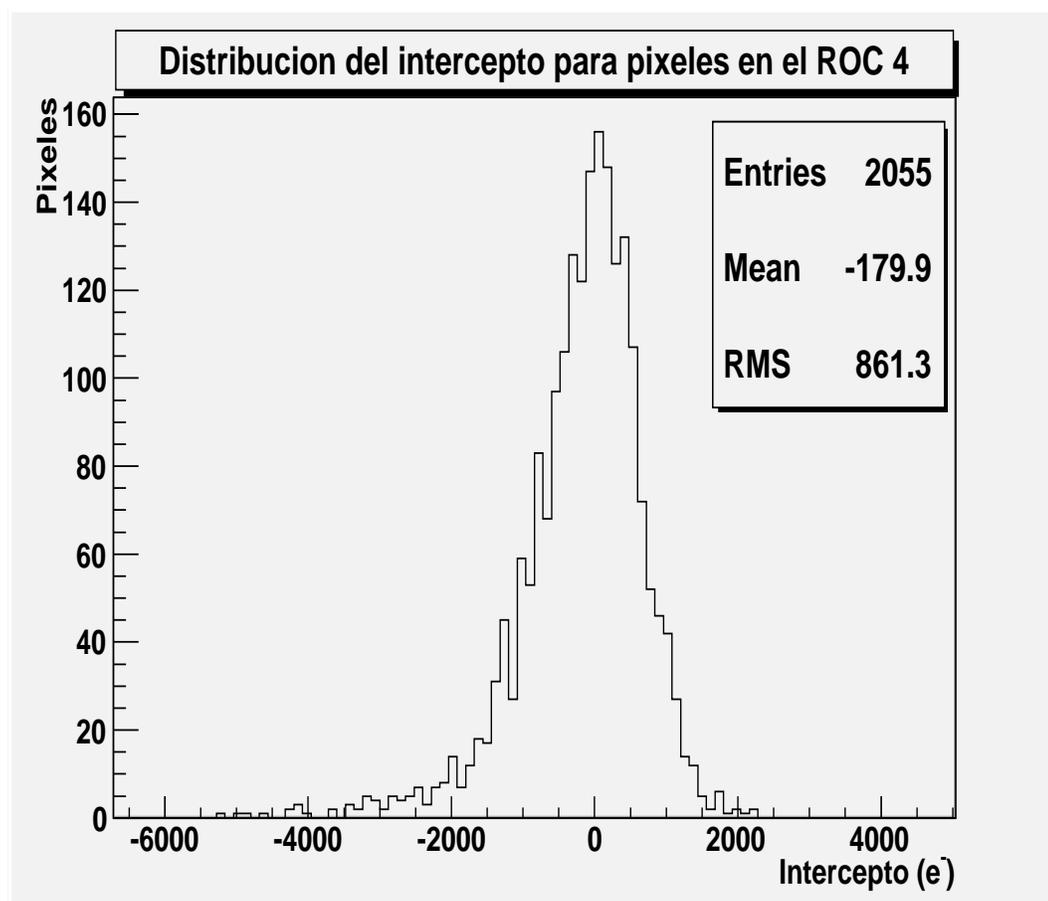


Figura 8-5: Distribución del intercepto para el *ROC* 4.

### 8.1.6. Resultados para los *ROCs* más iluminados.

Los resultados relevantes para el análisis realizado se resumen en la tabla 8.1.6. Se muestran los valores medios de las distribuciones junto con la magnitud de RMS.

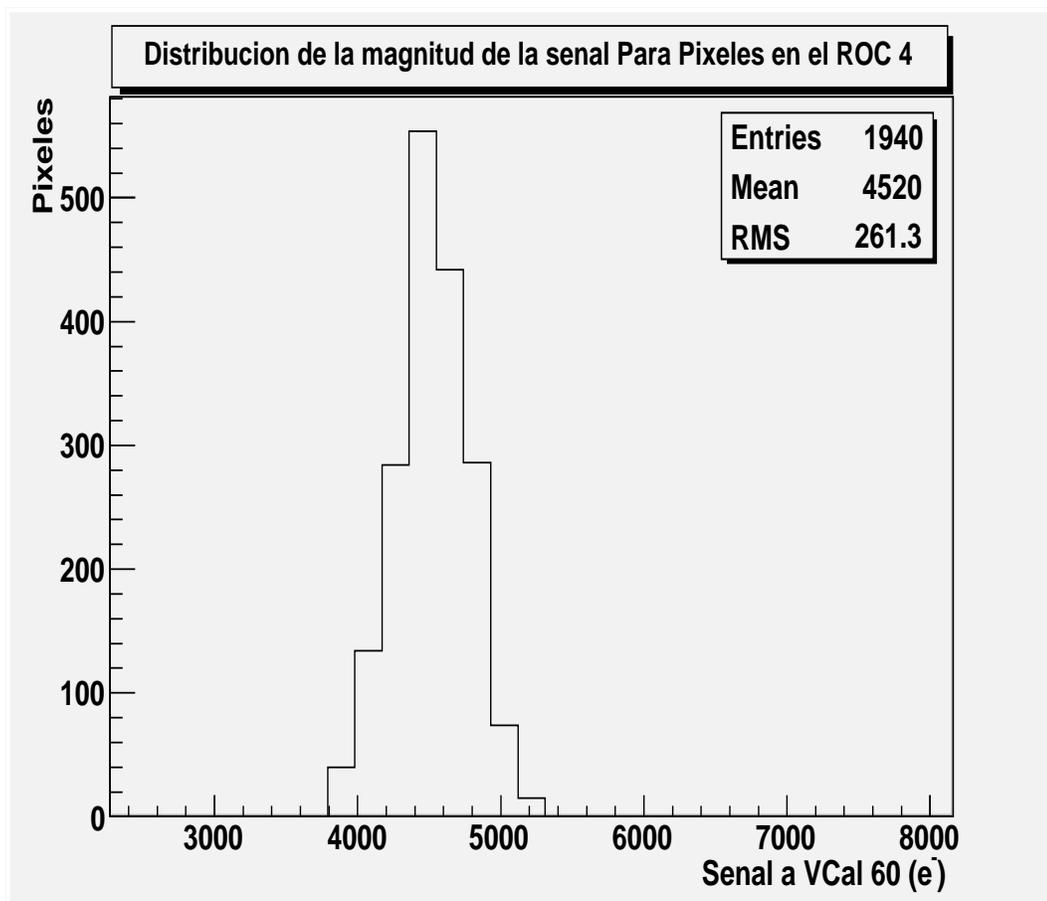


Figura 8-6: Distribución de la magnitud de la señal en electrones para una inyección de carga *Vcal* 60 en el *ROC* 4.

Tabla 8–1: Tabulación de los RMS y los valores medios de las distribuciones obtenidas en los ROC más iluminados.

ROC	RMS Pendientes $e^-/Vcal$	Media Pendientes $e^-/Vcal$	RMS Intercepto $e^-$	Media Intercepto $e^-$	RMS Señal Vcal 60 $e^-$	Media Señal Vcal 60 $e^-$
4	11.8	78.4	861	-180	261	4520
5	12.4	87.8	905	-617	225	4657
6	10.6	83.0	734	-321	235	4628
9	17.1	79.8	1241	-643	295	4220
10	8.6	79.1	660	-635	289	4098
11	12.1	76.3	963	-447	335	4130
Promedio	12.1	80.7	893	-474	275	4370

En el estudio realizado es de particular interés la magnitud de los RMS, ya que es la magnitud de las diferencias medias entre la calibración de  $Vcal$  entre píxeles. El valor del RMS obtenido es de **12.1**  $e^-/Vcal$ . La cantidad de píxeles considerados es aproximadamente del 50 % de los píxeles por cada ROC.

## 8.2. Relación de los resultados con calibraciones anteriores

En el proceso de cualificar cada uno de los módulos que fueron producidos para construir el barril del detector de píxeles, existían una serie de pruebas de calidad. La calibración del parámetro  $Vcal$  fue una de ellas [26]. Esta calibración se hizo de forma similar al procedimiento descrito en el capítulo 7.

La calibración se realizó únicamente tomando datos con dos energías de rayos X correspondientes a los blancos de molibdeno y plata, con energías de 17.44 KeV y 22.10 KeV respectivamente. Un total de 760 módulos fueron medidos de esta forma. La calibración con dos blancos tenía una duración de 15 minutos por módulo. En la

figura 8-7 (a) se muestra una gráfica que contiene la distribución de todos los *ROCs* que fueron calibrados.

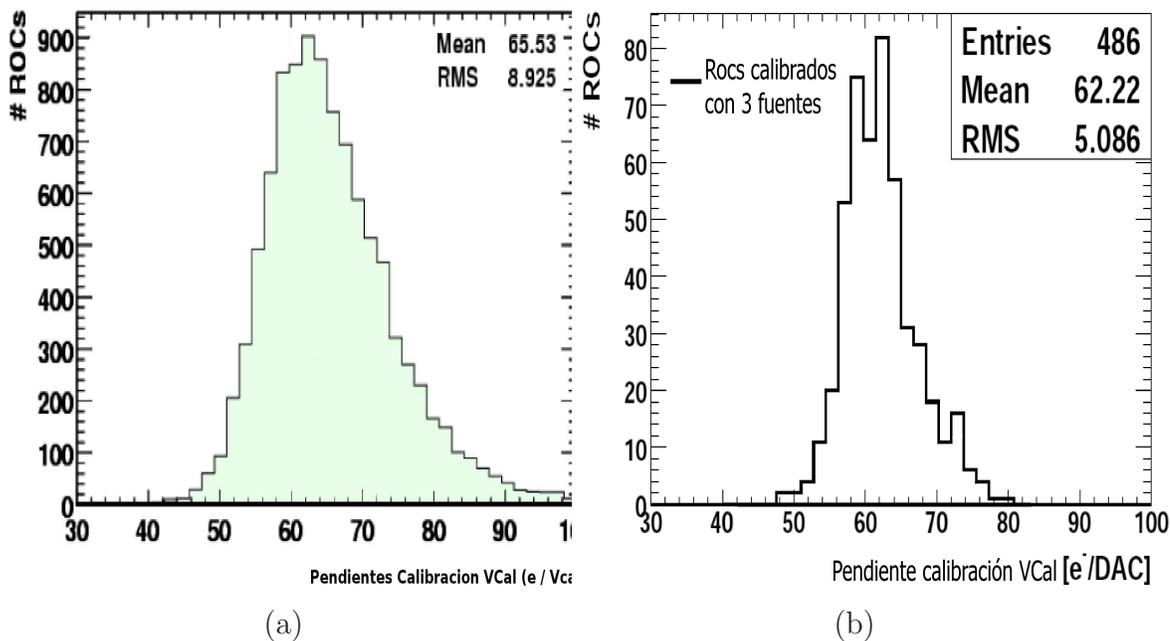


Figura 8-7: Distribución de pendientes calibración *VCal*. (a) 2 fuentes (b) 3 fuentes.

Con el fin de corroborar la linealidad de los módulos y validar los resultados, se tomó una muestra de 33 módulos que fueron medidos utilizando 3 energías de rayos X. La distribución se observa en la figura 8-7 (b). Utilizando blancos de molibdeno, plata y bario con energías de 17.44 KeV , 22.10 KeV y 32.06 KeV respectivamente. Cada calibración tenía una duración de 1 hora por módulo.

Las distribuciones presentan un RMS de 5.1 ( $e^-/Vcal$ ) para 33 módulos utilizando tres blancos y de 8.9 ( $e^-/Vcal$ ) para 764 módulos utilizando 2 blancos metálicos.

### 8.3. Comparación con resultados anteriores

Los resultados conseguidos en el pasado se pueden comparar con los nuestros, ya que fueron encontrados siguiendo el mismo método excepto que brindaron valores

promedios para todos los píxeles en un ROC mientras que nuestra calibración se hizo píxel por píxel. La magnitud de los valores del RMS de las distribuciones de  $V_{cal}$  se muestra en la tabla 8-2.

Tabla 8-2: Valor de los RMS para los dos tipos de calibración.

calibración	RMS pendientes ( $e^-$ )	RMS intercepto ( $e^-$ )	RMS Señal $V_{cal}$ 60 ( $e^-$ )
ROC x ROC (3 fuentes)	5.1	297	
Pixel x Pixel	12.1	893	275

Como se ve en la tabla 8-2, el RMS para las pendientes entre píxeles es casi dos veces mayor respecto al RMS entre *ROCs* con tres fuentes. Esto se puede explicar por el hecho de que la prueba realizada para *ROCs* toma el valor medio para todos los píxeles contenidos. Esto produce un efecto que descarta los anchos propios de cada distribución y por consiguiente la distribución de los valores medios debe tener un RMS menor.

En el caso de la prueba realizada a los píxeles se considera la información de forma independiente para cada píxel y el ancho de la distribución depende únicamente de la respuesta propia de cada píxel.

El detector utiliza este valor de la equivalencia de  $V_{Cal}$  a electrones junto con la calibración de *Pulse height* para calcular la posición de las partículas que atraviesan el sensor, así como la energía perdida por las mismas. En la actualidad el detector tiene en cuenta el valor de esta calibración por cada *ROC*, es decir, se utiliza el mismo valor de calibración de  $V_{Cal}$  para todos los píxeles de un mismo *ROC*.

En el detector existente no existe información suficiente para utilizar un valor de calibración individual para cada píxel. Este trabajo midió las variaciones entre píxeles, lo que aporta un parámetro importante a tener en cuenta en el uso del detector.

## Capítulo 9

# MONTAJE EXPERIMENTAL PARA MEDIR SENSORES IRRADIADOS

El montaje experimental es similar al utilizado para la calibración del parámetro  $V_{cal}$  explicada en los capítulos 7 y 8 de este trabajo. Una fotografía del montaje experimental se puede ver en la figura 9-1.

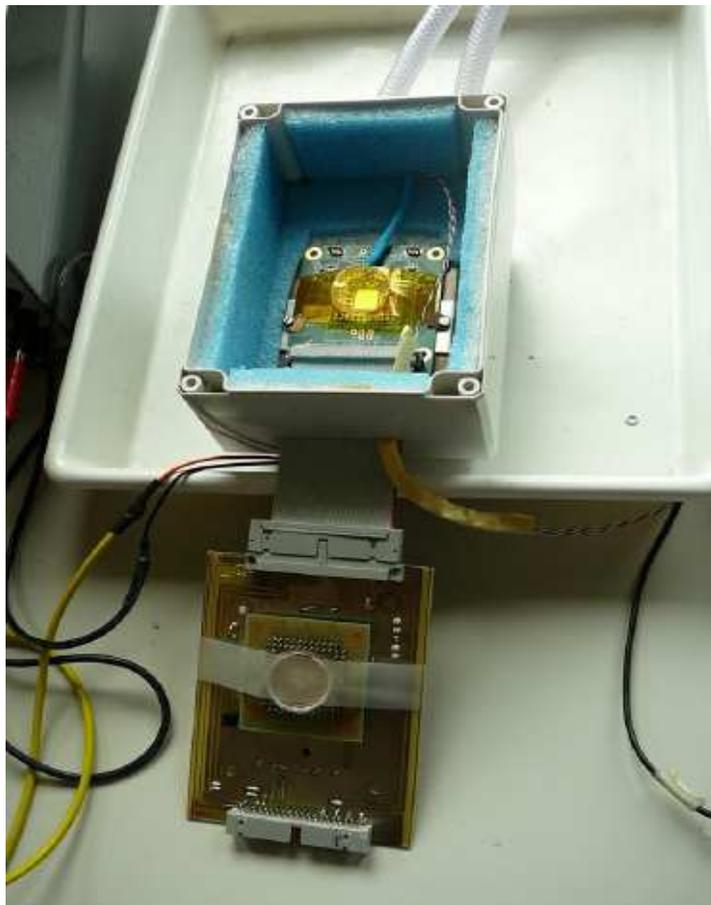


Figura 9-1: Montaje experimental sensores irradiados.

La tarjeta de pruebas explicada con detalle en la sección 7.1.1, es el instrumento que permite modificar la configuración del *ROC* y leer los datos provenientes de las medidas realizadas. El montaje se diferencia del utilizado para la calibración *VCal* en que el sensor no hace parte de un módulo completo.

El *ROC* está montado en una tarjeta independiente que sirve para fijar las conexiones y brinda soporte mecánico. Esta configuración requiere la utilización de un circuito acoplado a una segunda tarjeta que reemplaza al *TBM* y sincroniza la lectura del sensor con la tarjeta de pruebas.

El *ROC* fue colocado dentro de una caja refrigeradora que es operada usando un sistema *Peltier* refrigerado por agua. El sistema permitió poder realizar las medidas a una temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ . El interior de la caja refrigerada fue mantenido con bajos niveles de humedad, inferiores al 10 %, utilizando un flujo constante de nitrógeno para evitar la formación de hielo sobre el sensor.

La temperatura fue medida utilizando un dispositivo RTD, que es un sensor resistivo de temperatura del tipo *PT100*, fabricado de platino y tiene una resistencia de  $100\Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$ . La resistencia de un *PT100* depende de la temperatura de acuerdo a la ecuación 9.1, donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes dadas por el fabricante,  $R_0$  es el valor de la resistencia a  $T_0$  que es la temperatura de referencia.

$$R = R_0 \left( 1 + \alpha \left( T^{\beta} - T_0^{\beta} \right) \right) \quad (9.1)$$

La resistencia fue medida utilizando un óhmetro digital *Keithley 2400*, que brinda una resolución de medida de  $10\mu\Omega$  con un error de  $0,003\Omega$ .

La humedad fue medida utilizando un sensor *HIH 4000* que es un circuito integrado que produce una señal de voltaje que depende linealmente de la humedad relativa al que es expuesto. La medida se realizó utilizando el mismo dispositivo *Keithley 2400* como voltímetro.

### 9.0.1. Fuente Radioactiva Sr90

La fuente Sr90 emite partículas  $\beta^-$  que son apropiadas para el estudio realizado debido a que atraviesan completamente el sensor produciendo una distribución de Landau (sección 4.1.3). El espectro de emisión de la fuente puede verse en la figura 9-2.

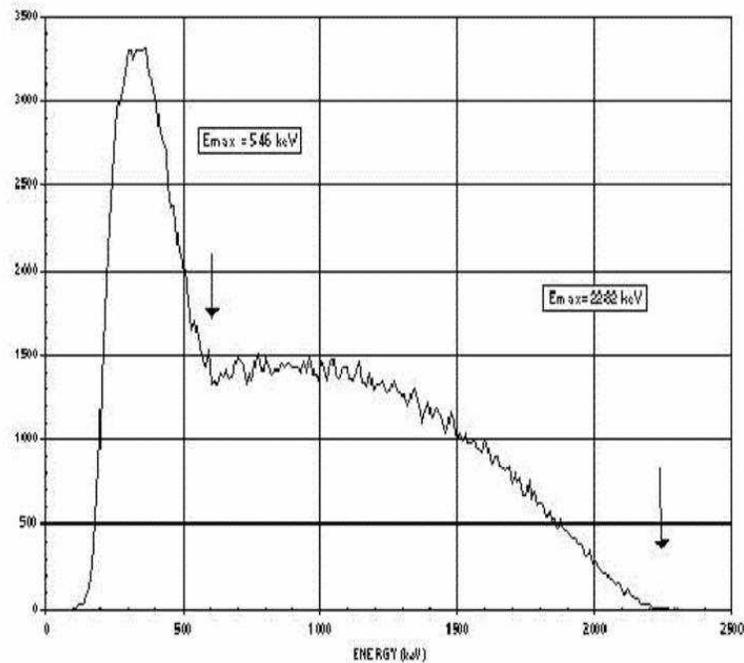


Figura 9-2: Espectro de partículas Beta Sr 90.

### 9.1. Descripción de las muestras de sensores

Se trabajó con una muestra de 51 sensores acoplados al respectivo chip de lectura (*ROC*). Cada sensor contiene 4160 píxeles en un arreglo de 52 columnas x 80 filas. La técnica de producción de cada sensor fue la misma utilizada para producir los sensores usados en el detector actualmente instalado. Esta técnica (llamada DOFZ) hace que, bajo los efectos de altas dosis de radiación, el sensor sea susceptible a sufrir un proceso de inversión, descrito en la sección 4.2.3.

De las 51 muestras, 32 fueron expuestas a diferentes dosis de radiación en las instalaciones del CERN en Ginebra, Suiza, utilizando protones con energía cinética de 24GeV y flujos de radiación de hasta  $5,1 \times 10^{15} \text{Neq} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Otras 15 muestras fueron irradiadas en el laboratorio PSI usando piones con energía cinética de 200MeV y con flujos de hasta  $6,2 \times 10^{14} \text{Neq} \cdot \text{cm}^{-2}$  y cuatro fueron mantenidas como grupo de control.

Cada sensor fue fijado previamente en placas individuales y expuesto a radiación directa sin voltaje inverso aplicado y a temperatura ambiente. Para reducir el efecto del proceso de templado las muestras se mantienen a temperaturas por debajo de  $-15^{\circ}\text{C}$  en un congelador dedicado para tal propósito.

## 9.2. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental consiste en varios pasos. El primero de ellos es la cualificación completa del sensor a una temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  utilizando los métodos descritos en el capítulo 6.

### 9.2.1. Toma de datos con la fuente Sr90

Usando un sistema con *trigger* aleatorio se tomaron datos, colocando la fuente de estroncio a una distancia aproximada de 1 centímetro sobre la superficie del sensor y aplicando un voltaje inverso de 25 voltios. Posteriormente se incrementó el voltaje en pasos de 25 voltios y se repitió la toma de datos, hasta llegar a 600 voltios. La toma de datos por cada valor de voltaje tiene una duración aproximada de 30 segundos.

Para cada valor de voltaje se construye un histograma de energía medida en el sensor. Las unidades del eje horizontal son unidades DAC, donde cada unidad equivale a 65 pares electrón-hueco generados dentro del sensor. Un ejemplo de una

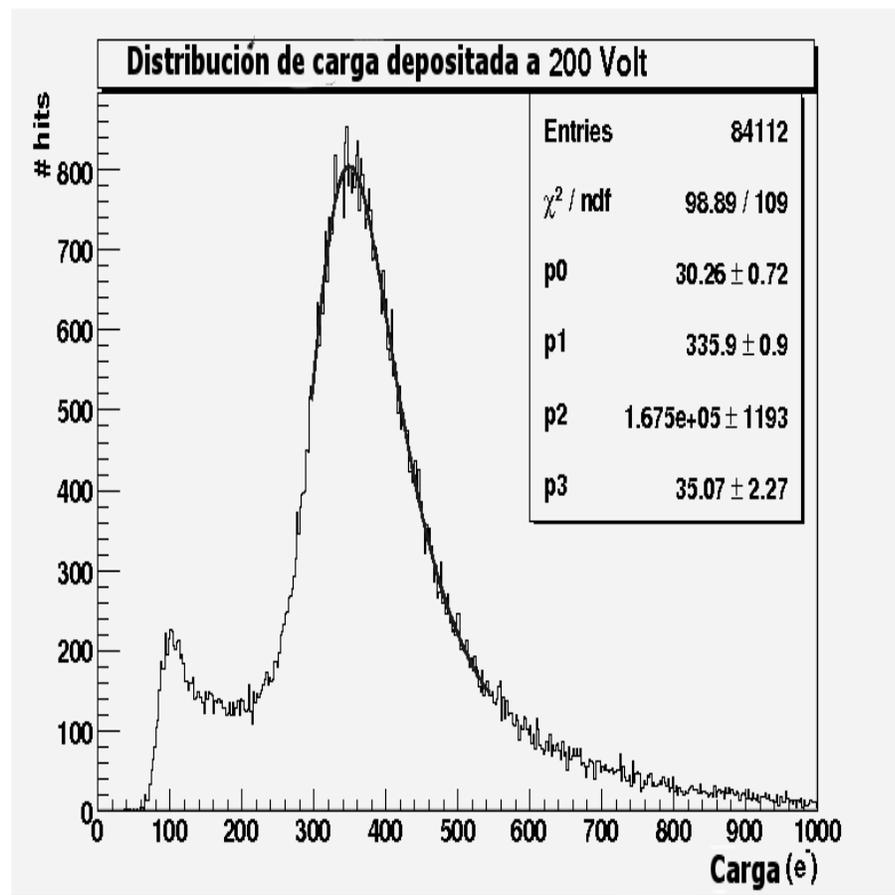


Figura 9-3: Distribución IEL con un voltaje inverso de 200V

distribución es mostrada en la figura 9–3. Cada distribución es ajustada utilizando una convolución de la distribución de Landau y una distribución normal.

Debido a que la radiación proveniente de la fuente de estroncio incide perpendicular al sensor, no deben existir *clusters* de gran tamaño.

### 9.2.2. Determinación del voltaje de operación

El voltaje de operación es el voltaje requerido para que la región de agotamiento llene completamente el volumen del sensor como se describe en la sección 4.2.4. Teóricamente cuando este voltaje es suficiente, toda la carga generada dentro del silicio es recolectada y puede ser medida, ya que los efectos de recombinación se reducen al mínimo en estas condiciones.

El ajuste hecho a cada distribución obtenida provee un parámetro llamado *MPV*, que es el valor más frecuente de electrones generados en el sensor. El número de electrones generados en el detector no depende del voltaje inverso aplicado; lo que se ve afectado es el número de estas cargas que son detectadas ya que un voltaje inverso menor al voltaje de operación produce una baja eficiencia de recolección de carga.

Para voltajes inversos aplicados mayores al voltaje de operación, pueden aparecer efectos adicionales como ionizaciones secundarias o efectos de cascada. Al ser acelerados los electrones originales por el voltaje inverso aplicado, si el voltaje inverso es demasiado grande se pueden producir ionizaciones secundarias que se traducen a un incremento en la magnitud de la señal la cual deja de ser proporcional al número de electrones originales, una condición que debe ser evitada.

### Construcción del gráfico valor más probable contra voltaje inverso

Luego de tomar datos en un rango suficiente de voltajes, cada distribución es analizada y de la misma se extrae el parámetro  $MPV$  del ajuste realizado. De esta forma se construye la gráfica que aparece en la figura 9-4.

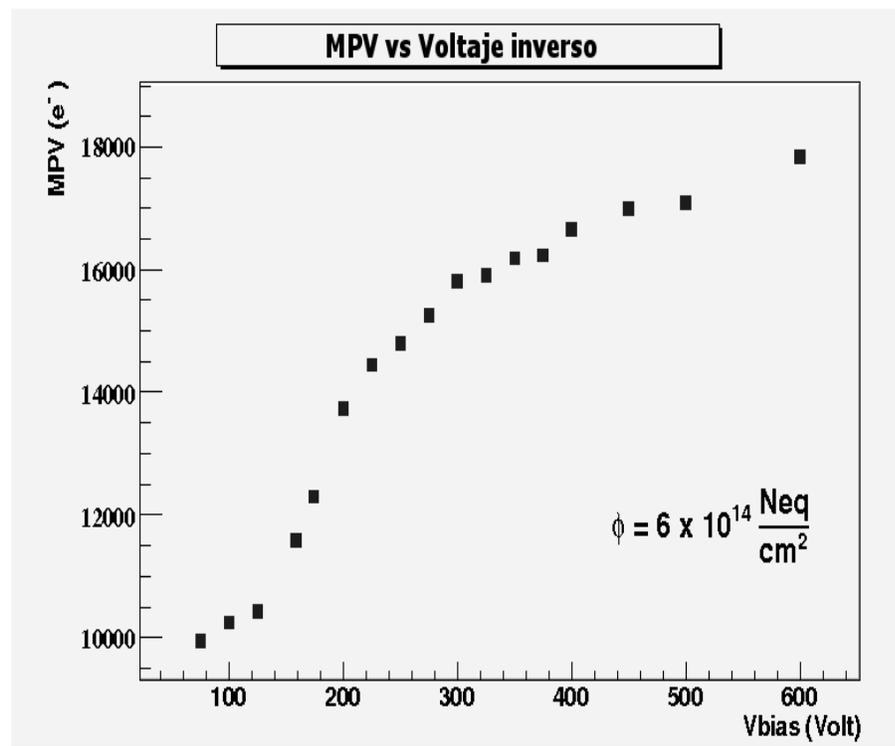


Figura 9-4: Gráfica  $MPV$  de cada distribución vs voltaje inverso.

### Método de intersección para encontrar el voltaje de operación

El método utilizado es un método gráfico, el cual permite estimar el voltaje al cual el detector tiene la zona de agotamiento ocupando todo el volumen disponible. Consiste en trazar dos líneas rectas en dos partes diferentes de la gráfica  $MPV$  vs voltaje inverso como se ve en la figura 9-5. La primera línea se traza en la parte de la gráfica donde se incrementa rápidamente el  $MPV$  respecto al voltaje inverso. La segunda línea recta se traza en la parte saturada de la gráfica. Esta segunda recta no necesariamente tiene una pendiente cero.

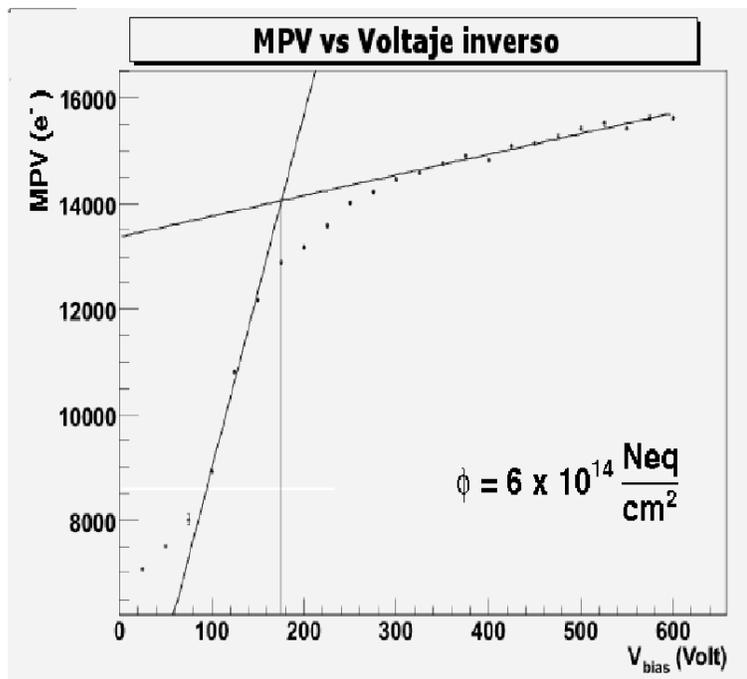


Figura 9-5: Método de intersección en una gráfica *MPV* vs voltaje inverso.

El punto de intersección se considera una buena aproximación para el valor del voltaje de operación.

# Capítulo 10

## RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE INTENSIDAD DE SEÑAL EN SENSORES IRRADIADOS

### 10.1. Voltaje de operación del detector

El cambio en el voltaje de operación requerido para mantener el silicio sin portadores en banda de conducción y poder operar el detector con normalidad, es un efecto importante producido por la exposición de los sensores a radiación. Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 9.2.2 se puede construir la gráfica 10-1 que muestra la combinación de los resultados para sensores expuestos a diferentes dosis de radiación, incluyendo sensores no irradiados. En el eje horizontal se representa el voltaje inverso aplicado y en el eje vertical se muestra el valor más probable del número de electrones generados dentro del detector.

Para cada gráfica correspondiente a un nivel de flujo de radiación, se ha encontrado el voltaje de operación requerido utilizando el método descrito en la sección 9.2.2. El resultado es mostrado en la figura 10-2.

El comportamiento observado es producido por el cambio en la estructura del sustrato de silicio tipo N original. Este sustrato contiene una concentración de oxígeno introducida durante el proceso de fabricación DOFZ. Cuando el sensor es irradiado con dosis superiores a  $10^{12} \text{Neq} \cdot \text{cm}^{-2}$ , se produce el proceso de inversión explicado en la sección 4.2.3 que convierte el sustrato en un material tipo P.

La ecuación 4.11 muestra que la relación entre la concentración de impurezas aceptoras  $N_A$  es proporcional a la magnitud del voltaje de operación, lo que implica

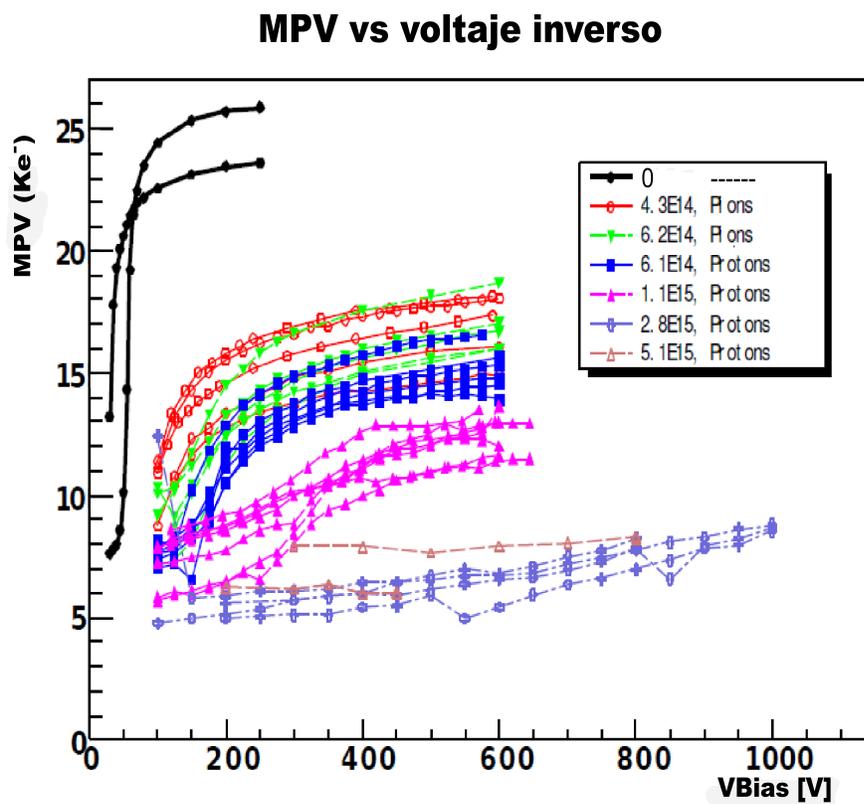


Figura 10-1: Gráfica *MPV* vs voltaje inverso para todo los sensores estudiados.

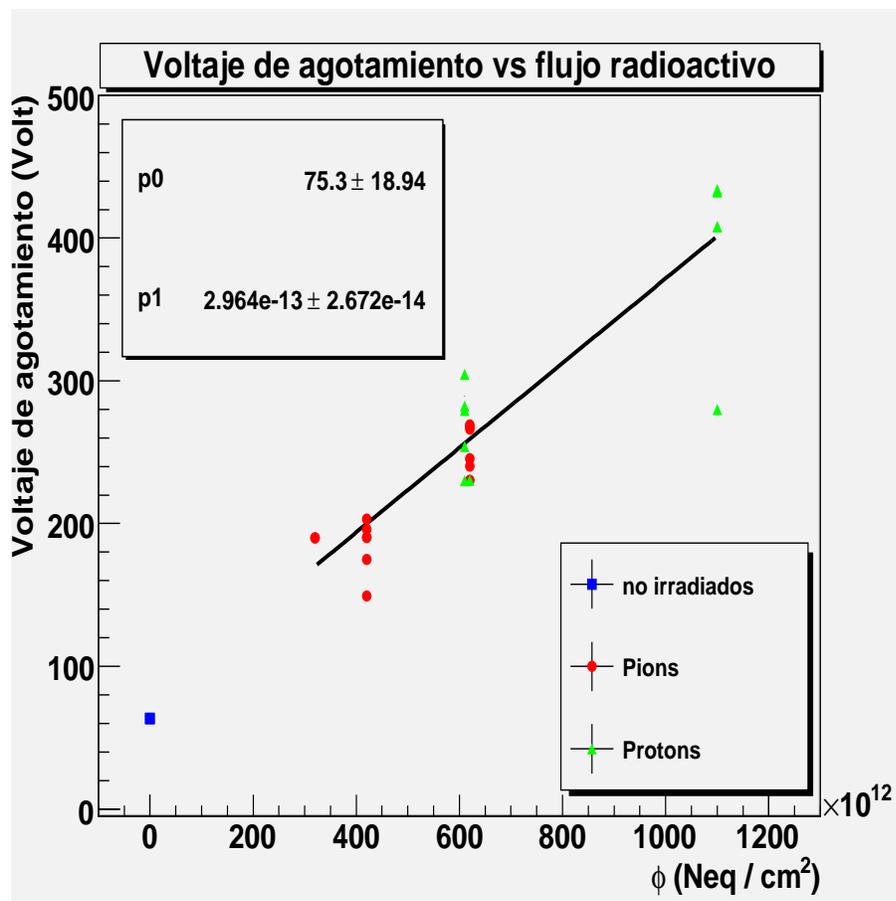


Figura 10-2: Voltaje de agotamiento contra flujo radioactivo.

un incremento de la concentración de impurezas aceptoras en el sustrato del material relacionado a un incremento en la concentración de complejos de defectos en el sustrato del sensor.

## 10.2. Corriente de fugas en las muestras estudiadas

Según lo explicado en la sección 4.2.5, las partículas que sufren pérdidas de energía mediante procesos NIEL, producen efectos sobre el silicio al cambiar la disposición geométrica del material.

Al aplicar el voltaje de operación requerido, se supone que todo el material se encuentre sin portadores libres, debido a que la zona de agotamiento llena todo el espacio físico del píxel. Sin embargo, pueden generarse pares electrón-hueco dentro del sensor mediante diferentes mecanismos descritos en el capítulo 4.

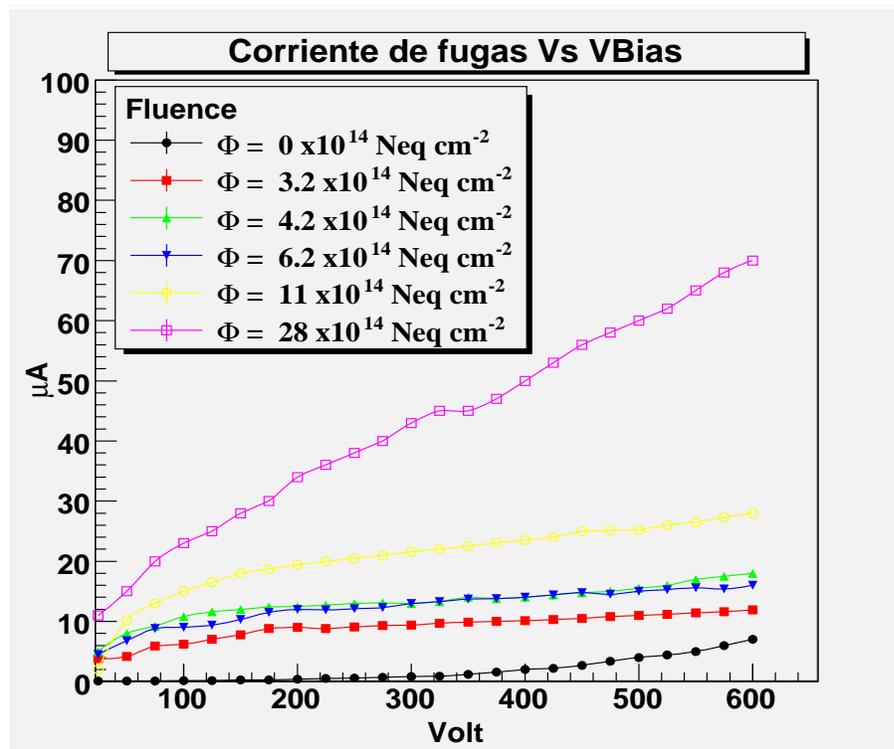


Figura 10–3: Corriente de fugas vs voltaje inverso para *ROC*s expuestos a diferentes dosis de radiación.

La relación entre la corriente y el voltaje inverso se comporta en forma similar a la curva característica de un diodo semiconductor. A medida que sobre el sensor se incrementa la dosis de radiación recibida, la corriente para cada voltaje inverso aplicado se hace mayor. La figura 10-3 muestra las medidas en un grupo de sensores sometidos a diferentes dosis de radiación. Los sensores provienen de una misma oblea de silicio. Las medidas fueron realizadas a una temperatura de  $-10^{\circ}C$ .

En la figura 10-3 se observa un claro incremento en la corriente de fugas para cada uno de los voltajes inversos aplicados. Un ejemplo del incremento de la corriente de fugas por unidad de volumen se muestra en la figura 10-4.

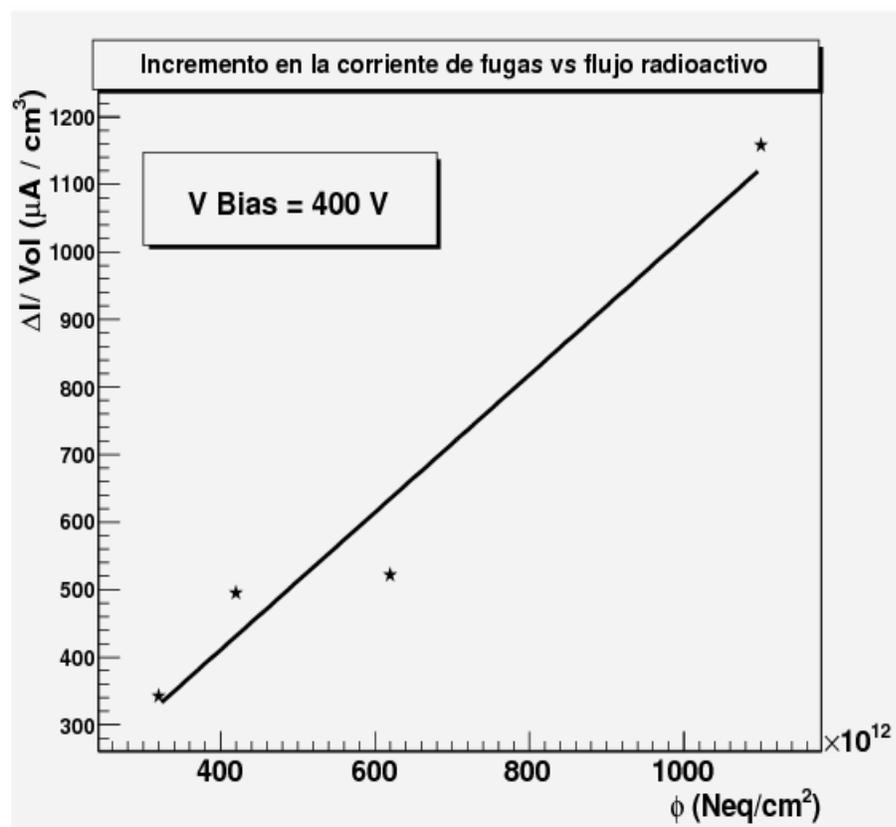


Figura 10-4: Corriente generada por unidad de volumen vs dosis para un voltaje inverso de 400 V.

La figura 10-4 muestra un incremento aproximadamente lineal consistente con la ecuación 4.13.

### 10.3. Efectos sobre la eficiencia de recolección de carga en los sensores

El daño producido por la radiación tiene efectos en el comportamiento del sensor. Un efecto sensible es la disminución en la capacidad de recolectar carga por parte del sensor como se muestra en la figura 10-5.

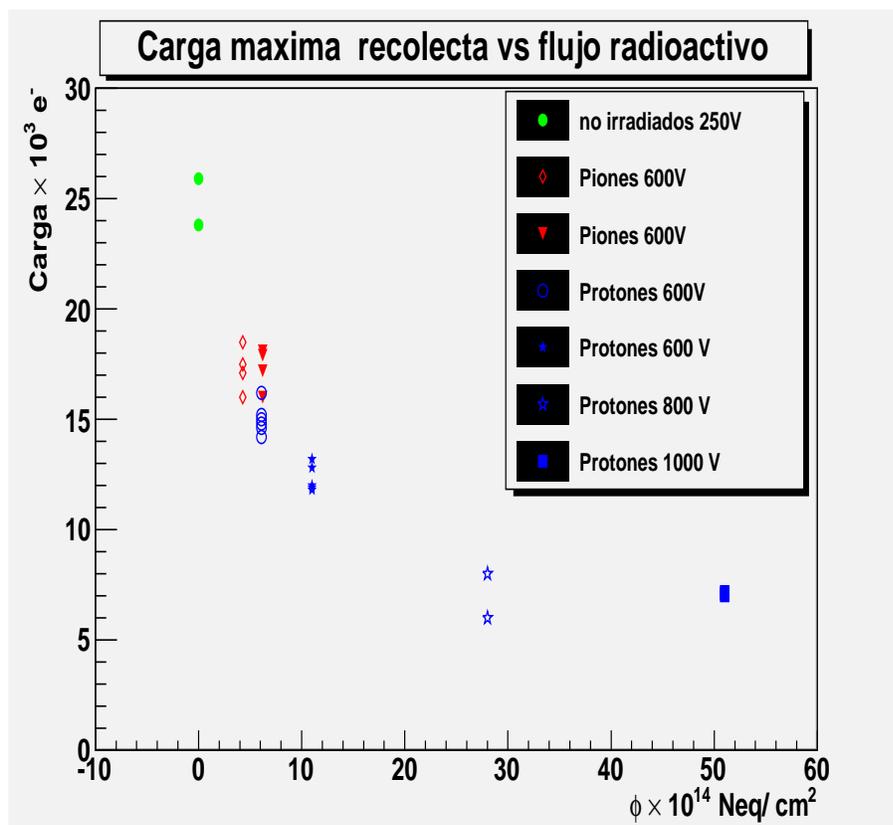


Figura 10-5: Máxima cantidad de carga medida en sensores sometidos a radiación.

La amplitud de la señal en los sensores se ve reducida debido al incremento de los complejos de defectos dentro del material. Estos hacen que los electrones generados dentro del silicio caigan en centros de recombinación con mucha mayor facilidad. Estas cargas son atrapadas momentáneamente y liberadas posteriormente mezclándose con la señal del ruido electrónico.

La velocidad de deriva de los portadores dentro del silicio también cambia al variar la concentración de impurezas aceptoras como muestra la ecuación 3.3. Esto se

traduce en una disminución de la eficiencia del sensor al recolectar la carga generada dentro de su volumen.

#### 10.4. Voltaje de operación del detector y el ángulo de Lorentz

Los resultados mostrados en sección 10.1 respecto a los voltajes de operación tienen un efecto claro sobre el ángulo de Lorentz, descrito en la sección 3.4. Al incrementar el voltaje de operación el ángulo de Lorentz se ve disminuido, haciendo que cada partícula afecte cada vez menos píxeles lo que reduce la resolución del detector.

#### 10.5. Tiempo útil del detector

El detector de píxeles trabaja con una luminosidad máxima de  $10^{34} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  y una energía máxima para choques protón protón de  $14\text{TeV}$ . Bajo estas condiciones, cada capa del barril del detector está expuesta a diferentes dosis de radiación y sufre daños a una razón diferente ya que el daño recibido depende de la distancia al centro de interacción. En la tabla 10-1 [27] se puede observar la cantidad de flujo radioactivo (NIEL) en un año de trabajo.

Tabla 10-1: Dosis de radiación recibida por las diferentes capas del detector de píxeles en un año trabajando a luminosidad máxima.

Capa	Dosis $\text{Neq} \cdot \text{cm}^{-2}$ LHC
1	$3 \times 10^{14}$
2	$1,2 \times 10^{14}$
3	$6 \times 10^{13}$

En las medidas realizadas en sensores expuestos a flujos radioactivos superiores a  $1,1 \times 10^{15} \cdot Neq \cdot cm^{-2}$ , fue posible medir señales separadas de la señal de ruido y calcular un voltaje de operación. Por este motivo es posible operar el detector de píxeles por más de 4 años ( $\approx 1 \times 10^{15} \cdot Neq \cdot cm^{-2}$ ) con todas las capas activas. De ese punto en adelante sólo se podrán utilizar las capas exteriores con la pérdida de resolución que eso implica.

El voltaje de operación requerido para mantener el detector de píxeles operando correctamente es elevado, superior a los 600 voltios. El efecto en la corriente de fugas y el incremento en el nivel de ruido hará muy difícil operar el detector después que haya recibido dosis de radiación superiores a  $2,8 \times 10^{15} \cdot Neq \cdot cm^{-2}$ .

Los resultados mostrados en este trabajo permiten determinar cuantitativamente cual ha de ser la vida útil del detector de píxeles de CMS en términos de la dosis de radiación que recibida.

# Capítulo 11

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se han descrito los procedimientos experimentales realizados para hacer las medidas sobre los sensores del detector de píxeles. En los capítulos 6, 7 y 9 se describieron las técnicas utilizadas en la cualificación y medidas del sensor de píxeles, con el propósito de mostrar las características y limitaciones de los montajes experimentales.

Los capítulos 8 y 10 se describió la forma de tratar los datos en cada experimento y los resultados arrojados por cada medición. Los estudios realizados proporcionan información suficiente para realizar conclusiones que serán descritas en la siguientes dos secciones.

### 11.1. Estudio de las diferencias de calibración del parámetro $Vcal$ entre píxeles

El capítulo 7 incluye la descripción del procedimiento experimental llevado a cabo, este procedimiento experimental tiene una larga duración y es sensible a sufrir variaciones estadísticas.

El proceso de filtrado de datos llevado a cabo mostró que con una sola toma de datos es posible extraer muestras de píxeles suficientemente grandes para hacer análisis en los cuales los efectos de los errores sistemáticos son mínimos.

El resultado mas importante de este estudio es la cuantificación de las diferencias entre píxeles respecto a la calibración  $VCal$ . La variación es de  $12.1 e^-/Vcal$ . Asociado al resultado anterior se encontró la magnitud de la señal equivalente a  $Vcal$  60 que es de  $4370e^-$  con un Valor de RMS de es de  $275e^-$ .

La cuantificación de las variaciones descritas aporta parámetros importantes a ser considerados en el detector, brinda información suficiente para calcular la resolución del detector.

### 11.2. Comportamiento de los sensores irradiados

Los sensores estudiados tienen las mismas características de los sensores que constituyen el detector de píxeles. Fueron expuestos a dosis de radiación equivalentes a las que recibirá el detector en varios años de funcionamiento.

El procedimiento experimental permitió determinar los cambios en funcionamiento que sufrirá el detector cuando acumule dosis de radiación equivalentes.

El resultado más importante de este estudio es la predicción del voltaje de operación requerido para utilizar el detector a diferentes dosis de radiación y de la corriente que circulara por el detector en estas condiciones. Esta predicción se puede realizar gracias a que tanto el voltaje de operación requerido y la corriente de fugas se incrementan de forma lineal con la dosis de radiación recibida.

En el caso del voltaje de operación requerido la pendiente de la correspondencia lineal es de  $3 \times 10^{-13} \text{Voltcm}^2/\text{Neq}$  y un intercepto de 75 V.

Una importante consecuencia de haber trabajado con sensores expuestos a altas dosis de radiación fue demostrar la posibilidad de medir señales en sensores con un alto grado de deterioro por radiación como en el caso de las muestras sometidas a flujos de radiación de  $2,8 \times 10^{15} \text{Neq/cm}^2$ .

### 11.3. Recomendaciones y trabajos futuros

La experiencia adquirida en el desarrollo experimental de este trabajo permite tener una visión más amplia de los problemas presentados durante su realización. El conocimiento adquirido sobre el manejo experimental de los sensores, la recolección de las señales y la solución a los problemas relacionados al montaje experimental son importantes para futuros estudios relacionados.

En general el montaje experimental es el mismo en ambos estudios y útil para estudios futuros. Una de las limitaciones del montaje experimental esta en el control de temperatura, pues es un factor que puede incidir en el comportamiento del sensor afectando su calibración. Es recomendable mejorar el sistema de medida con un sistema refrigeración que permita controlar la temperatura a la cual se desea trabajar.

En el caso del estudio de las diferencias de calibración  $V_{cal}$  entre píxeles es recomendable contrastar las medidas realizadas con otros módulos con el fin de incrementar la estadística y eliminar posibles errores sistemáticos no determinados en el módulo utilizado.

En el caso del estudio sobre sensores irradiados la configuración experimental puede aplicar como máximo 600 Voltios sin comprometer la funcionalidad de los circuitos usados para controlar los  $ROC$ s. Es recomendable desarrollar un sistema más robusto que proteja la electrónica de efectos colaterales y permita medir con voltajes inversos mayores.

## Bibliografía

- [1] CMS Collaboration. The compaq muon experiment. <http://cms.cern.ch>.
- [2] Milan Bicocca U. Overview of the cms pixel detector. *CMS/CR*, 2008.
- [3] Sarah Dambach. *CMS Pixel Module Readout Optimization and Study of the B0 Lifetime in the Semileptonic Decay Mode*. Disertacion, Swiss Federal Institute of Technology ZurichHamburg University, December 2009.
- [4] CMS Collaboration. The tracker project, technical design report. Technical report, 1998.
- [5] J.M. Martínez Duart J. M. Albella. *Fundamentos de electrónica física y micro-electrónica*. Addison Wesley Iberoamericana, first edition, 1992.
- [6] Gerhard Lutz. *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer, second edition, 2007.
- [7] Speer. T Wilke. L, Chiochia. V. Lorentz angle calibration for the barrel pixel detector. *CMS/CR*, (12), 2008.
- [8] G. et al Lindstrom. Radiation hard silicon detectors - developments by the rd48 rose collaboration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 466(2):308–326, 2001.
- [9] R. Kaufmann B. Henrich. Lorentz-angle in irradiated silicon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 477(1-3):304–307, 2002.
- [10] S. Swirhun J. del Alamo. Simultaneous measurement of hole lifetime, hole mobility and bandgap narrowing in heavily doped n-type silicon. *IEDM Technical Digest*, pages 290–293, 1985.
- [11] M.N. Mazziotta. Electron hole pair creation energy and fano factor temperature dependence in silicon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*

- Section A*, 584(1):436–439, 2007.
- [12] Richard Fernow. *Introduction to experimental particle physics*. Cambridge University Press, first edition, 1989.
- [13] C. Grupen Lawrence Berkeley National Laboratory. *Particle Detectors*. Cambridge University Press, third edition, 1996.
- [14] National Institute of standards and technology (NIST). Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. <http://www.nist.gov/physlab/data/xraycoef/index.cfm>.
- [15] Eric Gullikson. X-ray properties of the elements. [http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/pert\\_form.html](http://henke.lbl.gov/optical_constants/pert_form.html).
- [16] Michael Moll. *Radiation Damage in Silicon Particle Detectors*. Disertacion, Hamburg University, 1999.
- [17] Benker. M Wunstorf. R. Result of radiation hardness of silicon detectors up to neutron fluences of  $10^{15} \text{neqcm}^{-2}$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 315(2):149–155, 1992.
- [18] M. Huhtinen. Simulation of non-ionising energy loss and defect formation in silicon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A.*, 491(1-2):194–215, 2002.
- [19] Atlas Pixel detector collaboration. Fluences in atlas pixel detector. <http://www.atlas.uni-wuppertal.de/optolink/fluences.html>.
- [20] Höerman Christoph. *Design and performance of the silicon pixel detector modules for the CMS experiment*. Disertacion, Swiss Federal Institute of Technology ZurichHamburg University, 2006.
- [21] Kurt Gabathuler. Psi46 pixel chip - external specification. Technical report, PSI, Noverber 2005.
- [22] P. Trüb U. Langenegger, A. Starodumov. Test and qualification procedures of the cms pixel barrel modules. Technical Report 006, CERN, February 2006.

- [23] Peter Trüb. *CMS Pixel Module Qualification and Monte-Carlo Study of. Dis-* ertacion, Swiss Federal Institute of Technology ZurichHamburg University, September 2008.
- [24] Lawrence Berkeley National Laboratory. X-ray spectrum of elements on the periodic table. <http://ie.lbl.gov/xray/mainpage.htm>.
- [25] CERN. Root reference-guide documentation. <http://root.cern.ch/drupal/content/reference-guide.html>.
- [26] R. Horisbergerb A. Starodumov, W. Erdmannb. Qualification procedures of the cms pixel barrel modules. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A.*, 565(1):67–72, 2006.
- [27] D. Kim D. Bortoletto, D. Sanders. Fluence dependence of charge collection of irradiated pixel sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A.*, 552(1):232–282, 2005.

**ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE CALIBRACIÓN VCAL  
ENTRE PÍXELES Y ESTUDIO DE LOS EFECTOS  
MACROSCÓPICOS DE LA RADIACIÓN SOBRE SENSORES DEL  
DETECTOR DE PÍXELES DE CMS**

John Gabriel Acosta Castillo  
Departamento de Física  
Consejero: Ángel M. López  
Grado: Maestría en Ciencias  
Fecha de Graduacion: Agosto 2010